

REVISÃO DE LITERATURA

SOLOS DO PASSADO: ORIGEM E IDENTIFICAÇÃO⁽¹⁾

Francisco Sergio Bernardes Ladeira⁽²⁾

RESUMO

Solos resultam da interação de fatores e processos operantes nas diferentes paisagens da superfície terrestre. Ao longo do tempo geológico, essas paisagens se modificam, bem como os perfis de solo a elas associados. Decorrentes de processos eólicos, hídricos, tectônicos, climáticos ou mesmo da atividade antrópica, essas mudanças remodelam a paisagem de forma gradual ou catastrófica e, geralmente, irreversível, destruindo os solos associados. Entretanto, determinadas situações permitem que os solos sejam originalmente preservados em áreas específicas dessa paisagem pretérita, incorporando-se a sequências sedimentares ou vulcânicas, gerando os denominados paleossolos. Estes fornecem informações e evidências valiosas em estudos de reconstituições paleoambientais, principalmente quando o registro fóssilífero é raro ou inexistente, na caracterização de antigas atmosferas e paleoclimas, de correlações estratigráficas, como indicativo de antigas superfícies de relevo, de certas concentrações minerais, de paleoprocessos pedogenéticos, processos sedimentares, como indicativo de deriva continental, na geoarqueologia. No Brasil, pesquisas envolvendo paleossolos são ainda relativamente raras e recentes, cujo marco inicial data da década de 1970, ao passo que nos Estados Unidos e na Europa pesquisas em que os paleossolos constituem o cerne da investigação ou possuem papel de destaque estão bastante avançadas e disseminadas. Esta revisão trata dos conceitos básicos da paleopedologia, objetivando despertar o interesse, no meio científico pedológico, para esse tema ainda pouco explorado no País.

Termos de indexação: paleopedologia, paleossolo, paleoambiente.

SUMMARY: SOILS OF THE PAST: ORIGIN AND IDENTITY

Soils are a result of the interaction between forming factors and processes in the different landscapes of the Earth's land surfaces. Long-term processes change landscapes and associated soil profiles. These changes result from gradual or catastrophic processes of eolian, tectonic and climatic or even human impact, and are generally irreversible, destroying the associated

⁽¹⁾ Recebido para publicação em fevereiro de 2010 e aprovado em setembro de 2010.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, UNICAMP. Caixa Postal 6152, CEP 13083-970 Campinas (SP). E-mail: fsbladeira@ige.unicamp.br

soils. Nevertheless, in particular situations soils may remain preserved in a specific area of the ancient landscape, embedded in sedimentary and volcanic sequences, resulting in the so-called paleosols. Paleosols are a source of relevant information for a variety of purposes and are particularly valuable in providing evidence for reconstructing past terrestrial ecosystems and environments, mainly in the case of rare or nonexistent fossils; for the characterization of ancient atmospheres and paleoclimate, stratigraphic correlations, as indicator of old relief surfaces, of mineral concentrations; pedogenetic paleoprocesses and sedimentary processes, and as indicator of continental drift in geoarchaeology. In Brazil, studies of paleosols are still rare and relatively recent, beginning in the 1970s, in contrast to the United States of America and Europe, where such studies are quite advanced and widely reported. This review discusses relevant concepts in paleopedology, with the purpose of arousing some interest, mainly among the pedologic scientific community of Brazil, where little research work on this subject is available yet.

Index terms: Paleopedology, paleosols, paleoenvironment.

INTRODUÇÃO

A paleopedologia é o estudo de solos antigos, tendo por objeto solos soterrados e, ou, incorporados a sequências sedimentares, ou ainda solos desenvolvidos em superfícies de relevo pretéritas (Andreis, 1981) e que, embora mantidos em superfície e influenciados por mudanças ambientais posteriores (Retallack, 1990), evidenciam antigos ambientes e contêm registros a respeito de clima, cobertura vegetal, formas de relevo, intensidade da pedogênese e taxas de sedimentação vigentes durante sua formação (Wright, 1992; Kraus, 1992). Assim, a paleopedologia é, por excelência, uma área interdisciplinar (Retallack, 1998).

Destaca-se que, quando um solo é soterrado, sem qualquer tipo de alteração ambiental, ele não deve ser denominado paleossolo, pois não é resultado de condições ambientais pretéritas.

Segundo Retallack (1990, 1998), a literatura internacional já indicava a existência de paleossolos desde James Hutton, em 1795. Andreis (1981) também destaca os trabalhos de Frank Leverett, de 1898, e John Hardcastle, de 1889, como estudos pioneiros acerca de paleossolos. No século XX, surgiram diversas publicações, especialmente a respeito de paleossolos do Quaternário em sequências *loess*/paleossolo e também de paleossolos pré-quaternários, sobretudo aqueles cujo enfoque priorizava a reconstrução de antigos ambientes de sedimentação e de processos geológicos (Andreis, 1981), onde as principais sequências de paleossolos analisadas se desenvolveram sobre sedimentos aluviais e deltaicos (Wright, 1992).

Em 1971, com a publicação do livro organizado por Dan H. Yaalon (*Paleopedology: origin, nature and dating of paleosols*), a paleopedologia passa a contar com um livro-texto em que as questões teórico-conceituais acerca de paleossolos começam a ser mais bem delineadas e divulgadas. No Brasil, embora alguns artigos e teses (Suguio, 1973; Queiroz Neto, 1974; Mabessone & Lobo, 1980) tenham abordado

anteriormente o tema, a publicação feita por Renato R. Andreis em 1981 (*Identificación e Importancia Geológica de los Paleosuelos*), apesar de escrita em espanhol, representa um marco na divulgação da paleopedologia no Brasil.

No final do século XX e início do século XXI, a paleopedologia apresentou grandes avanços, especialmente decorrentes de estudos interdisciplinares e de técnicas analíticas mais finas. Esses avanços são reflexos também da constatação de sua relevância como instrumento para análises e reconstituições paleoambientais (Andreis, 1981; Goldbery, 1982, 1984; Petrov, 1991; Retallack, 1990, 1997a; Sheldon & Tabor, 2009), na caracterização de antigas atmosferas e paleoclimas (Boucot & Gray, 1991; Parrish, 1998; Bradley, 1999; Sheldon & Tabor, 2009), para correlações estratigráficas (Wright, 1992; Firman, 1994; Kraus, 1999), como indicativo de antigas superfícies de relevo (Andreis, 1981; Ollier, 1991; Schaefer & Dalrymple, 1995; Ollier & Pain, 1996; Zeese, 1996; Pillans, 2006), de certas concentrações minerais (petróleo, carvão, ferro, urânio, caulim, etc.) (Andreis, 1981; Kraus, 1992; Wilson, 1983; Frimel, 2005), de processos pedogenéticos (Andreis, 1981; Retallack, 1990, 1997a), processos sedimentares (Davies & Gibling, 2010), como indicativo de deriva continental (Kumar, 1986; Tardy & Roquin, 1998), na geoarqueologia (Retallack, 1991; Holliday, 1992; Rapp Jr. & Hill, 1998; Stein & Ferrand, 2001; French, 2003; Goldberg & Macphail, 2006).

Atualmente, a Paleopedologia é reconhecida como uma área do conhecimento com forte aplicabilidade em diferentes ramos do conhecimento, fato que tem estimulado a produção científica nessa área, constatado pelo grande número de artigos nas revistas internacionais, especialmente naquelas da área de Geologia.

Esta revisão trata dos conceitos básicos da paleopedologia, sem a pretensão de esgotar o assunto, objetivando despertar o interesse, sobretudo no meio científico pedológico, para esse tema ainda pouco explorado no País e estimular o crescimento dos estudos brasileiros acerca de paleossolos.

OS PALEOSSOLOS NO REGISTRO GEOLÓGICO

Os solos, aos quais hoje estamos familiarizados, nem sempre existiram sobre a superfície terrestre. Perfis de alteração existem desde o Pré-Cambriano (Retallack, 1990), porém os perfis de alteração desse momento histórico da Terra não se comportavam exatamente como os solos atuais, sobretudo devido à ausência de vegetais sobre a superfície terrestre.

Em decorrência desse fato, alguns autores empregam definições amplas para solo, interpretando-o como produto do intemperismo químico e, ou, físico e, ou, biológico (Retallack, 1990, 1997a). De acordo com essa definição, os solos poderiam existir desde a formação da primeira crosta na Terra, incluindo até mesmo alterações presentes em outros planetas. Alguns autores denominam esses materiais de alteração como “protossolos” (Hunt, 1972). À luz dessa concepção, publicou-se um volume especial da revista *Precambrian Research* dedicado aos solos do Pré-Cambriano (volume 32, números 2/3 de 1986). No entanto, uma parcela significativa dos pesquisadores especializados em paleossolos não adota tal definição, pois dificulta o uso do princípio do atualismo.

Os solos, tal como hoje os observamos, somente surgiram sobre a superfície terrestre a partir do avanço das primeiras plantas sobre esta, fato que ocorre no andar Ludloviano do Siluriano (422.9 milhões de anos a 418.7 milhões de anos). A partir desse momento, surgiram alguns dos solos com características similares às dos atuais, apesar de essas primeiras plantas ainda não apresentarem raízes. As raízes surgem no andar Lochkoviano no Devoniano (416 milhões de anos a 411), o que permitiria inclusive, com certas restrições e adaptações, a classificação dos solos formados nesse período segundo os sistemas de classificação atuais (Algeo et al., 2001; Driese & Mora, 2001).

Perfis de alteração desenvolvidos no Pré-Devoniano apresentam certa dificuldade de interpretação como sendo perfis de solo. Na ausência de agentes biológicos, o intemperismo próximo à superfície apresentou, fundamentalmente, interação entre a rocha e os gases do ambiente atmosférico vigente no período. Nesse caso, “solos” do Pré-Devoniano foram importantes fontes de informação semiquantitativa a respeito das características de oxirredução da atmosfera quando se desenvolveram.

Infelizmente, a identificação desses perfis de alteração nem sempre é fácil, pois, na ausência de traços de raízes e estruturas pedogenéticas, eles podem ser indistinguíveis das rochas sedimentares. Apenas nos locais onde as zonas de alteração forem intensamente intemperizadas é que estas podem ser utilizadas como indicativos de “paleoatmosferas”. Essas zonas de intemperismo são mais evidentes sobre rochas de origem ígnea ou metamórficas de alto grau, mais homogêneas quanto à textura, mineralogia e composição

química. Assim, variações nessas características no sentido vertical (do topo para base) seriam associadas então ao intemperismo. Na identificação desses “paleossolos” normalmente são utilizadas relações moleculares Ca/Al, Na/Al, Mn/Al e K/Al, que normalmente decrescem em direção ao topo do perfil, enquanto os valores de Ti/Al, Ti/Zr e Al/Zr permanecem inalterados ao longo do perfil (Rye & Holland, 1998).

Sinteticamente, na identificação dos perfis de alteração Pré-Devonianos são utilizados cinco critérios: (a) o perfil deve ter se originado a partir de rochas homogêneas e preservado *in situ*; (b) apresentar alterações mineralógicas; (c) apresentar alterações texturais; (d) alterações químicas – estes três últimos critérios devem ser consistentes com os processos de intemperismo que caracterizam um “solo”; e (e) presença de contato nítido com a rocha sobreposta ao perfil (Rye & Holland, 1998).

Estudos com esse tipo de perfil de alteração foram importantes para identificar o aumento de O₂ na atmosfera, entre 2,44 e 2,2 bilhões de anos, indicando o forte incremento de Fe³⁺ e o surgimento de *red beds* no período (Rye & Holland, 1998).

No entanto, ao se considerar o conceito de solo no qual a presença da cobertura vegetal é condição intrínseca, pode-se concluir que os solos nem sempre existiram sobre a superfície terrestre, ou seja, seu desenvolvimento teria início exatamente no momento em que as primeiras espécies vegetais começaram a recobri-la.

As primeiras formas vegetais que colonizaram a superfície terrestre aparecem no final do período Siluriano, período no qual os primeiros fósseis vegetais terrestres são encontrados e os primeiros perfis de solos surgem (Figura 1).

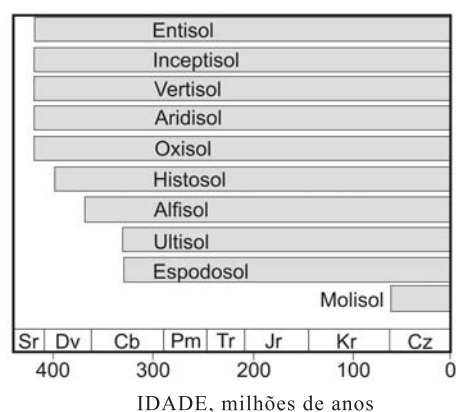


Figura 1. Ordens de solos e respectivas origens no registro geológico (Classificação Americana). Para Retallack (1986) as Ordens existentes desde o Siluriano poderiam já existir anteriormente. As outras Ordens surgiriam apenas associadas à vegetação. O Molisol só aparece no Cenozoico associado ao surgimento das gramíneas. Sr: Siluriano; Dv: Devoniano; Cb: Carbonífero; Pm: Permiano; Tr: Triássico; Jr: Jurássico; Kr: Cretáceo; Cz: Cenozoico. Fonte: adaptado de Retallack (1986).

Essas primeiras plantas terrestres provavelmente apresentavam aspectos taloides, não vasculares e com forte dependência de corpos de água. Até o Devoniano Médio, os solos seriam pouco espessos, devido ao pequeno porte e enraizamento pouco profundo das plantas, bem como à restrição da ocorrência dos solos aos corpos aquosos. Entre os andares Pragiano e Givetiano (411,2 a 385,3 milhões de anos) (Algeo et al., 2001) surgem as primeiras árvores com raízes de até 3 cm de diâmetro, possibilitando maior independência dessas plantas em relação aos corpos aquosos, as quais, a partir desse momento, irão recobrir a superfície terrestre, e os solos passam a existir sobre toda a superfície. Algeo et al. (2001) destacam ainda que, no andar Givetiano, as plantas passaram de altura máxima de 2 para 30 m, com significativo aumento da profundidade do sistema radicular e troncos com 1,5 m de diâmetro (Thomas & Spicer, 1987). A possibilidade de maior distribuição geográfica dos vegetais vasculares leva a uma efetiva estabilização da paisagem no que se refere a processos erosivos e ao aumento do desenvolvimento da espessura dos solos, já que o sistema radicular também fica mais denso e profundo, juntamente com o aumento da massa vegetal e a produção de ácidos orgânicos.

Durante o Devoniano Inferior/Médio, as plantas provavelmente ocupavam as partes secas das planícies aluviais costeiras; entretanto, no final desse período as comunidades de plantas arbustivas e arbóreas, especialmente aquelas que haviam desenvolvido os sistemas de raízes, já mencionadas, haviam invadido as porções interiores dos continentes, em áreas interfluviais (Driese & Mora, 2001).

Nota-se, portanto, que o surgimento dos primeiros vegetais terrestres e, conseqüentemente, dos solos no

registro geológico implicou mudança ambiental considerável durante o final do Siluriano e durante o Devoniano (Algeo et al., 2001). Houve incremento significativo nas taxas de intemperismo físico e especialmente químico, incremento no volume dos solos, alterações no ciclo hidrológico e maior estabilização das formas de relevo (Figura 2).

Davies & Gibling (2010) destacam que os padrões de drenagem são alterados significativamente nesse período. A partir do Devoniano Inferior os sistemas dominantes passam a ser os meândricos, os quais praticamente inexisteriam até então. Antes do Devoniano o padrão *braided* era totalmente dominante, indicando o predomínio de elevadas taxas de erosão mecânica com predomínio de materiais mais grosseiros. Após a colonização dos vegetais nas bacias e conseqüente incremento da formação de solos, os sedimentos tornaram-se mais finos e a dinâmica da água na bacia também se modifica, com menores taxas de escoamento superficial e aumento significativo das taxas de infiltração, acelerando as taxas de intemperismo químico e formação de argilas.

Além das modificações sobre a superfície terrestre associadas à dinâmica de erosão/deposição e modificações nos padrões fluviais e de características dos materiais transportados por estes, a presença de plantas vasculares sobre toda a superfície terrestre possível de ser colonizada intensificou os processos pedogenéticos por toda a superfície, o que provocou significativa redução nos teores de CO₂ atmosférico, seja associado ao crescimento das primeiras florestas, seja ao incremento das taxas de intemperismo de minerais silicatados (Berner, 2003; Mintz et al., 2010). Segundo Retallack (1997b), Algeo et al. (2001), Berner (2003) e Mintz et al. (2010), esse processo desempenhou

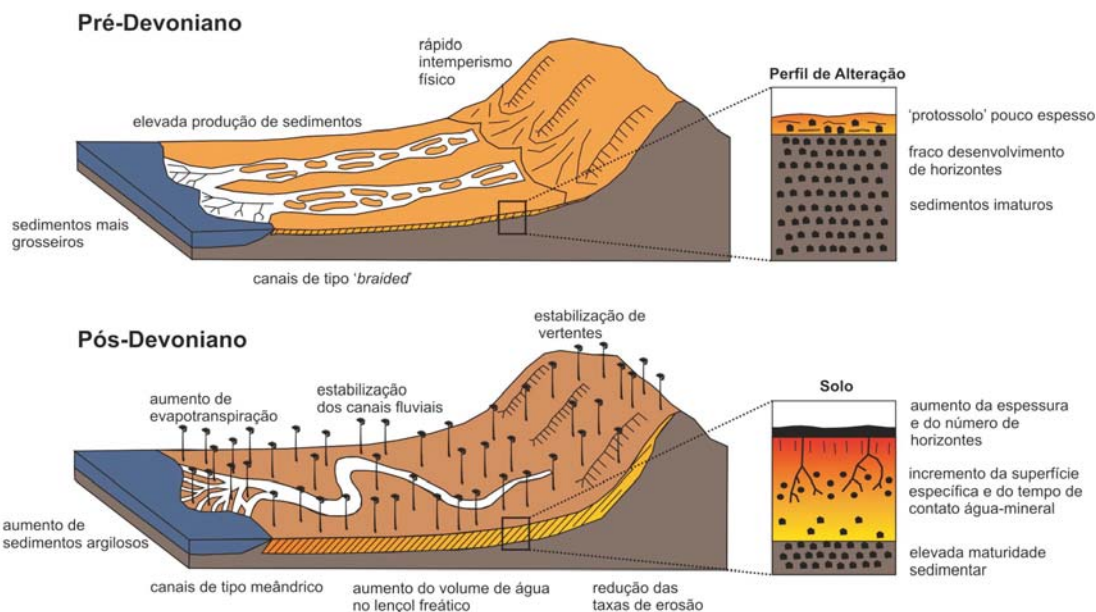


Figura 2. Alterações no ciclo hidrológico e nos processos de alteração pedogenética decorrente da colonização da superfície terrestre pelas plantas vasculares. Fonte: adaptado de Algeo et al. (2001).

papel fundamental na redução do efeito estufa, resultando na glaciação do final do Devoniano, entre 377 e 362 milhões de anos atrás. Segundo Berner (2003), essa glaciação teria reduzido as áreas com cobertura vegetal e as temperaturas menores levaram a uma redução do intemperismo químico, estabelecendo um novo equilíbrio no sistema CO₂/vegetação/intemperismo químico, distintamente do que existia anteriormente.

IDENTIFICAÇÃO DE PALEOSSOLOS

Apesar da forte ligação entre a paleopedologia e a pedologia por meio dos conceitos básicos e metodologias que ambas possuem em comum, a primeira desperta forte interesse em pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento, ainda em detrimento daqueles com formação básica em pedologia. Dessa forma, nos trabalhos publicados no Brasil, quase sempre restritos a teses e dissertações acadêmicas, os paleossolos estão inseridos numa abordagem estratigráfica e sedimentológica, as quais nem sempre apresentam uma preocupação com a descrição/identificação destes de forma mais detalhada.

Conforme mencionado, há quase um consenso de que solos, similares aos atuais em termos de estrutura pedogenética, horizontes e bioturbação possuem sua origem no Paleozoico Médio, quando as primeiras plantas surgem sobre a superfície terrestre.

Essas informações são fundamentais para a definição da linha de trabalho do paleopedólogo, pois, quando se observa um paleossolo, o ambiente de formação deste não existe mais, sendo praticamente impossível resgatar a tridimensionalidade do solo, pois os perfis/afloramentos raramente o permitem.

Nota-se que, para os estudos paleopedológicos, é fundamental definir o que é considerado solo. A definição de solo pode variar segundo a formação e o interesse do profissional que o estuda. Buol et al. (1997) definem solo como um corpo natural de minerais e matéria orgânica que mudam, ou mudaram, em resposta ao clima e aos organismos. Essas mudanças são denominadas pedogênese. Na concepção de Catt (1987), solo corresponde a camadas superficiais da crosta terrestre que foram modificadas por processos dependentes da proximidade da atmosfera. Esses processos corresponderiam a: (a) intemperismo químico; (b) intemperismo físico; (c) lixiviação de minerais solúveis em ambientes úmidos; (d) concentração de sais solúveis nos horizontes superficiais do solo em ambientes secos; (e) incorporação de matéria orgânica decomposta proveniente de plantas no solo; (f) iluviação de partículas sólidas, especialmente a argila; (g) processos de gleização associados à hidromorfia; e (h) bioturbação decorrente da ação de raízes e animais presentes nos solos. Essas definições indicam que o solo, resultante

da interação de diferentes fatores de formação (Jenny, 1994), necessita de vida biológica para poder evoluir e se transformar, estando integrado a uma determinada paisagem. Ruellan (2005) salienta que solo é um corpo natural que possui três dimensões espaciais e uma temporal.

Ruellan (1971) também afirma que os solos podem enquadrar-se em três grandes categorias: solos que refletem as condições atuais do ambiente, não apresentando qualquer evidência de ambientes pretéritos; solos que apresentam feições reliquiais que indicam ambientes pretéritos distintos do atual; e solos enterrados, que, em última instância, é um caso particular da última categoria.

Especificamente tratando de paleossolos, Andreis (1981), a partir de diversos autores, reconhece três grandes tipos (Figura 3):

Solos reliquiais: correspondem àqueles que permaneceram expostos desde sua formação, em ambientes antigos, até os dias de hoje; assim, suas propriedades resultam do somatório de processos pedológicos superpostos que sucederam nesse espaço de tempo.

Solos soterrados: são aqueles formados em uma superfície de relevo pretérita, recobertos por depósitos sedimentares, sendo sua gênese independente das condições ambientais na superfície atual, pois suas características pedológicas ficaram preservadas pelo soterramento. Portanto, a evolução dos solos soterrados pré-quadernários é o resultado dos processos pedogenéticos anteriores ao soterramento profundo do solo e subsequente transformação por diagênese incipiente destes.

Solos exumados: são aqueles que estiveram soterrados, guardaram suas características pedológicas durante certo tempo e, posteriormente, foram expostos à nova pedogênese, mais recente, em decorrência da erosão dos materiais sobrepostos.

Estes dois últimos tipos parecem ser os mais adequados para distinguir solo de paleossolo, já que, no primeiro tipo (solos reliquiais), os processos continuam a atuar sobre os materiais contínua e cumulativamente, dificultando a distinção entre o que seria resultado dos processos atuais e o que seria herdado de processos pretéritos. Essa constatação corrobora Queiroz Neto (1974), que já assinalava essa mesma dificuldade em definir precisamente solos reliquiais, pois, ao menos na sua porção superficial, continua evoluindo mesmo após as modificações das condições bioclimáticas.

A interpretação pedogenética dos perfis de paleossolos desenvolvidos sob condições ambientais pretéritas implica certa complexidade de análise, apesar de esses solos terem se desenvolvido sob processos que, basicamente, podem ter sido similares àqueles vigentes nas diversas paisagens pedológicas atuais (Firman, 1994). Isso ocorre devido à dificuldade no reconhecimento de uma série de processos

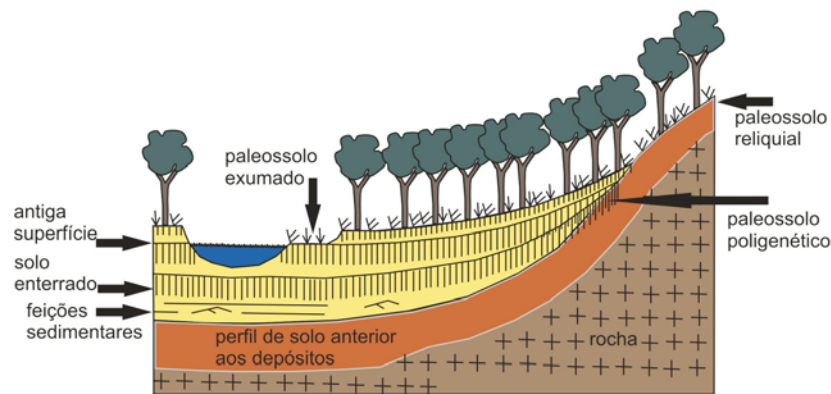


Figura 3. Paleossolos na paisagem. Fonte: Retallack (1990).

posteriores que os afetaram, como alterações decorrentes da superposição de diferentes processos pedogenéticos sucessivos (perfis poligenéticos) e, ou, da ação de processos diagenéticos posteriores (Andreis, 1981).

Devido a essa complexidade envolvendo a análise de paleossolos, notadamente daqueles pré-quadernários, Wright (1992) propôs algumas características diagnósticas de paleossolos. Essas características correspondem àquelas associadas aos processos de iluviação, eluviação, gleização (com certas restrições), às marcas de raízes e também à estrutura. Tais feições são correlativas ao desenvolvimento pedológico antecedente ao soterramento do solo, podendo, portanto, ser utilizadas nos estudos paleopedológicos como indicadores diagnósticos dos processos atuantes à época de sua formação. Entretanto, existem outras feições que normalmente evoluem em solos, as quais podem não ser consideradas diagnósticas de uma antiga pedogênese e, portanto, de um paleossolo, se forem fruto de sua evolução posterior ao seu soterramento, pois seriam correlativas aos processos diagenéticos que se seguiram, como a rubefação, destruição das evidências de estratificação, formação de crostas, mosqueados e outras. As feições de hidromorfia, por exemplo, podem estar associadas à oscilação do lençol freático atual, posterior à paleopedogênese e até à diagênese, dentro do próprio pacote sedimentar.

Para Retallack (1990, 1997a), as feições diagnósticas de paleossolos são três: marcas de raízes (Figura 4), horizontes de solo (Figura 5) e estruturas pedogenéticas (Figura 6), devendo-se encontrar ao menos duas dessas feições para caracterizar um paleossolo. Essas feições são consideradas diagnósticas em razão de não poderem ser produzidas por processos diagenéticos. Outras feições ou características comuns em solos, como nódulos e concreções, concentrações de acumulação de argila, carbonatos ou Fe, bioturbação, zonas de perda de bases, podem ser geradas em diversos ambientes de deposicionais ou mesmo por processos diagenéticos. Essas características ou feições somente poderão ser utilizadas (com restrições) se as feições diagnósticas forem encontradas no material.

Em decorrência dessas características, a análise paleopedológica é essencialmente morfológica, seja em macro ou em microescala. Apesar de as análises químicas, mineralógicas e isotópicas serem comuns na análise paleopedológica, elas constituem informações secundárias, uma vez que essas características, eventualmente, podem ter sido modificadas por processos posteriores ao soterramento do solo.

Dentre as três feições diagnósticas utilizadas na identificação de um paleossolo, as marcas de raízes são as mais destacadas, pois indicam, macroscopicamente, a evidência da presença de vegetais, principal indicativo da existência de solo. Contudo, sua identificação pode não ser tão evidente no registro geológico, visto que as marcas de raízes podem ser muito similares àquelas deixadas por animais escavadores, o que não indicaria, necessariamente, a existência de um solo. Dessa forma, Driese & Mora (2001) indicam as seguintes características morfológicas para se distinguir entre uma estrutura criada por uma raiz e uma originada por um animal:

- Traços produzidos por animais apresentam diâmetro constante em toda a sua extensão, enquanto aqueles criados por raízes normalmente diminuem em profundidade e nas bifurcações.
- Raízes de plantas normalmente possuem ramificações e bifurcações para cima ou para baixo (com raras exceções), enquanto poucos traços de animais apresentam forte ramificação em direção à base do perfil.
- Traços de animais apresentam normalmente meniscos constituídos de materiais terrígenos, produzidos durante a escavação pelos apêndices dos animais (Figura 7), ausentes nas marcas de raízes.
- Traços de raízes de plantas podem possuir argilas iluviadas que exibem fábrica birrefringente sob luz polarizada; estas argilas podem ser depositadas como cutans nas margens da raiz, quando a planta ainda estava viva ou logo depois de morta.
- Traços de raízes são mais comumente cimentados por carbonatos que traços de animais e tipicamente constituídos de micrita.

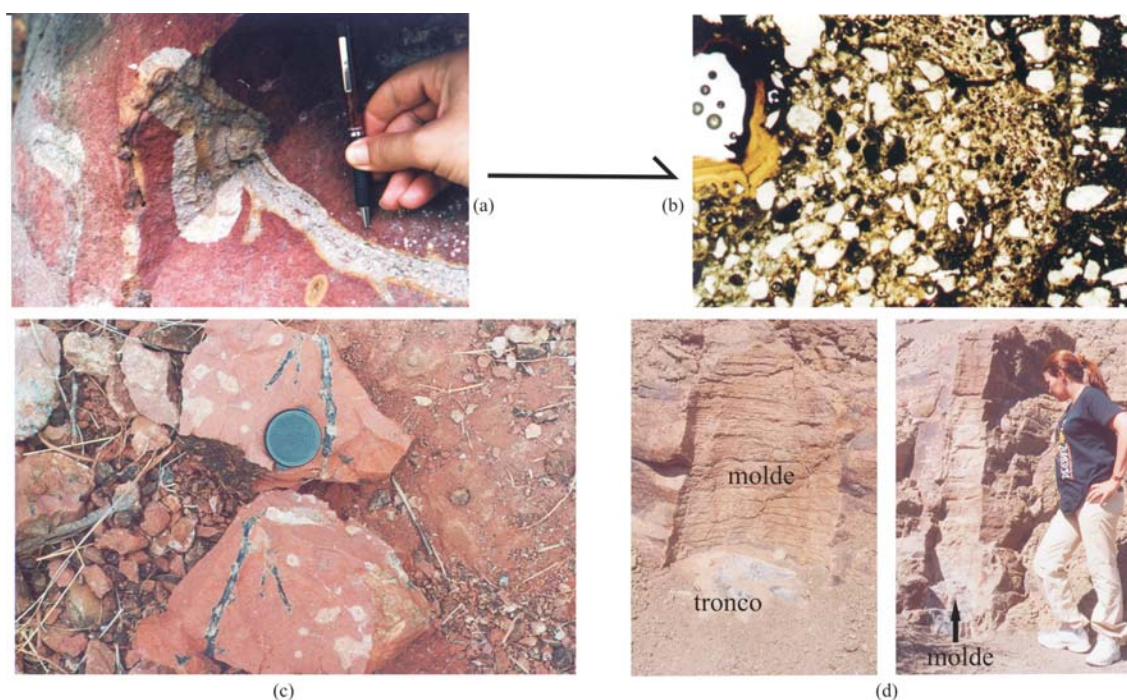


Figura 4. (a) Marca de raízes apresentando halos de redução (Formação Itaqueri, Paleógeno, São Pedro, SP); (b) Fotomicrografia da marca de raiz anterior apresentando no centro cutan de iluviação e halo com esqueleto orientado (LN, 2,5x, sem impregnação); (c) Marcas de raízes na Formação Marília (Cretáceo, Itajá, GO); (d) Tronco de conífera do Triássico na região de Uspallata, Argentina. Estes troncos estão em posição de vida (as árvores foram soterradas vivas por fluxos piroclásticos), o que os tornam excelentes indicadores da presença de paleossolos em sua base.

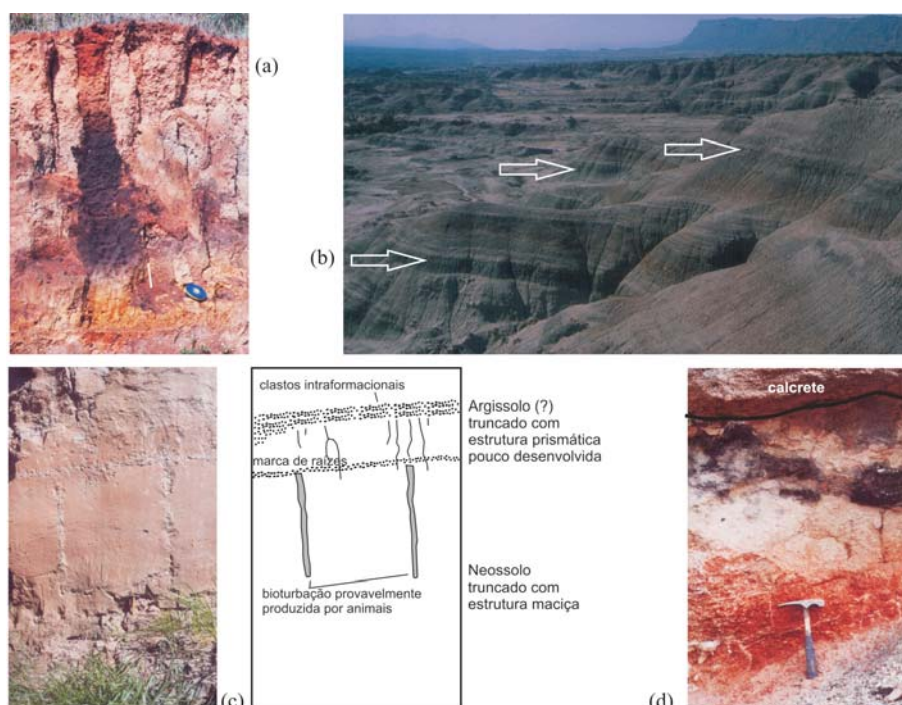


Figura 5. (a) Horizonte orgânico enterrado na Serra da Mantiqueira (Minas Gerais), datado com ^{14}C em 30.070 anos; (b) Horizontes orgânicos (indicados pelas setas) na Formação Ischigualasto (Triássico, Província de San Juan, Argentina); (c) Horizontes truncados na Formação Marília (Cretáceo, Echaporã, SP); (d) Horizontes pedológicos na Formação Los Llanos (Cretáceo, Província de La Rioja, Argentina). Na porção superior da foto há um perfil de calcrete que apresenta um ninhal de dinossauros.

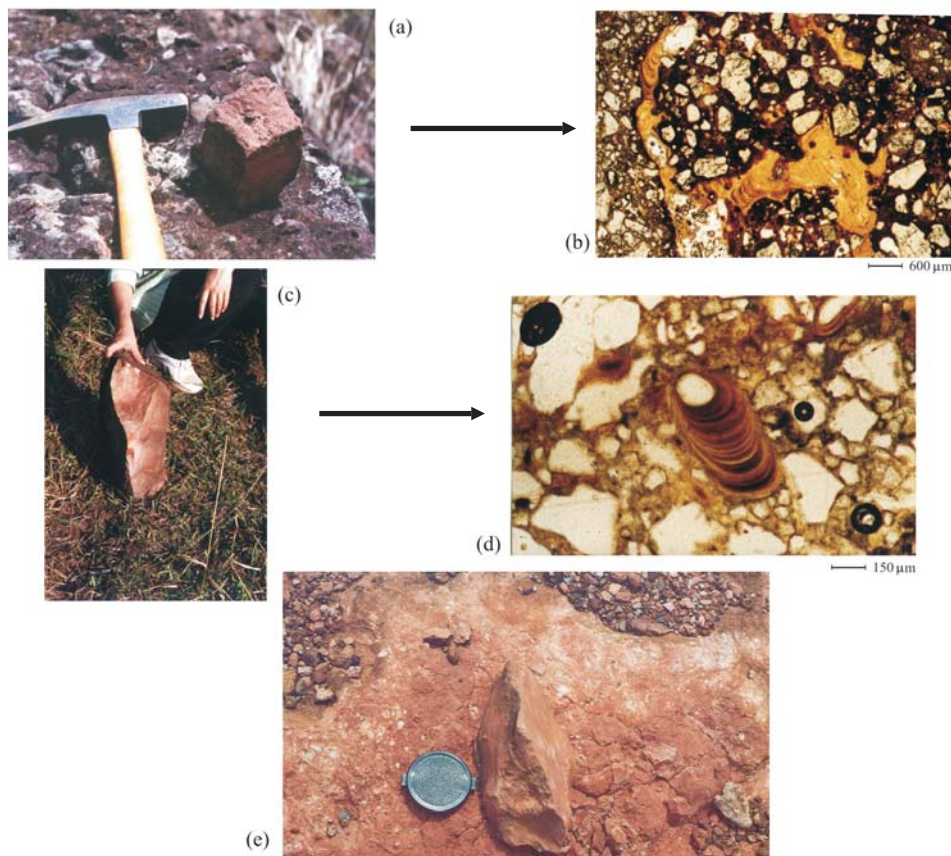


Figura 6. (a) Estrutura em bloco na Formação Itaqueri (Paleógeno, São Pedro, SP); (b) Fotomicrografia de cutan de iluviação (LN, 10x, sem impregnação); (c) Estrutura prismática na Formação Itaqueri (Paleógeno, São Pedro, SP); (d) Isotúbulo na estrutura prismática com cutans de iluviação (Formação Itaqueri, Paleógeno, São Pedro, SP) (LN, 2,5x, sem impregnação); (e) Estrutura de Vertissolo definida, em todos os lados, por *slickensides* (Formação Marília, Cretáceo, Itarumã, GO).



Figura 7. Bioturbação gerada por invertebrados em horizonte glei (Formação Marília, Cretáceo, Duartina, SP).

Além dessas características, Retallack (1990) afirma que os traços de raízes também podem ser identificados pela eventual formação de halos de redução, associados à acidificação que a raiz provoca em seu entorno, seja em vida, seja no momento de sua decomposição (Figura 4).

Outra feição diagnóstica é a estrutura pedológica. A pedalidade é uma propriedade bastante estável do solo, e, muitas vezes, juntamente com as propriedades cromáticas do solo, são evidências incontestáveis de

reconhecimento de um paleossolo no afloramento. Estruturas planares podem ser confundidas com heranças da estratificação da rocha sedimentar ou resultado da compactação por soterramento (apesar de esta ser comum em horizontes ricos em carbonato de cálcio), mas estruturas prismáticas ou em blocos são típicas da pedogênese e estão preservadas desde o Paleozoico (Andreis, 1981). Estruturas maciças podem estar associadas a antigos Latossolos, porém muitas vezes é difícil a distinção entre estes e estruturas maciças associadas à deposição dos sedimentos.

No que se refere aos horizontes pedológicos, raramente os horizontes A são preservados nos paleossolos, pois normalmente são erodidos antes de novo depósito ou podem ser fortemente alterados pela decomposição da matéria orgânica após o soterramento (Andreis, 1981). Em geral, horizontes A são mais comuns em sequências de *loess*/paleossolo (figura 8) ou em sequências *tephra* (Figura 9). Por sua vez, os horizontes B e C são os mais facilmente identificáveis em sequências de paleossolos, podendo ser identificados pelas cores, pedalidade, concreções e diferentes feições pedogenéticas.

Embora algumas dificuldades de interpretação possam surgir, métodos provenientes de áreas de pesquisa correlatas foram sendo incorporados por alguns autores e modificados ou adaptados para o estudo específico dos paleossolos, facilitando sua identificação e a interpretação de sua gênese.

A primeira contribuição é de escala megascópica, advinda das análises sedimentares e pedológicas. Alguns autores, como Andreis (1981), salientam que o desenvolvimento de solo, dentro de uma sequência sedimentar, implica ambientes com baixa energia de sedimentação, pois ambientes com forte a moderada energia de sedimentação são desfavoráveis à sua formação, já que o aporte de sedimentos seria muito enérgico, além de facilitar a erosão dos materiais

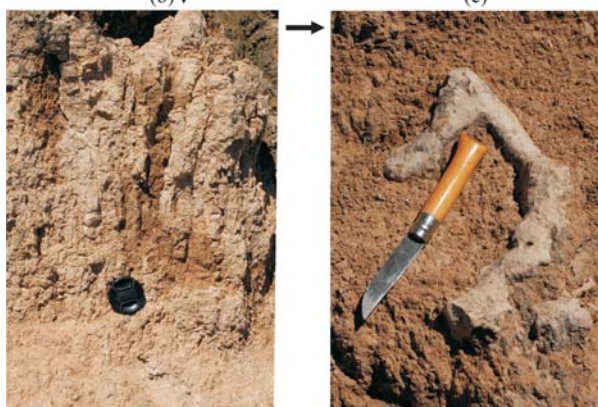


Figura 8. (a) Perfil de paleossolo (Pleistoceno) desenvolvido a partir de depósitos de loess (La Plata, Argentina); (b) Detalhe do perfil do paleossolo; (c) Rizoconcreção de carbonato de cálcio.

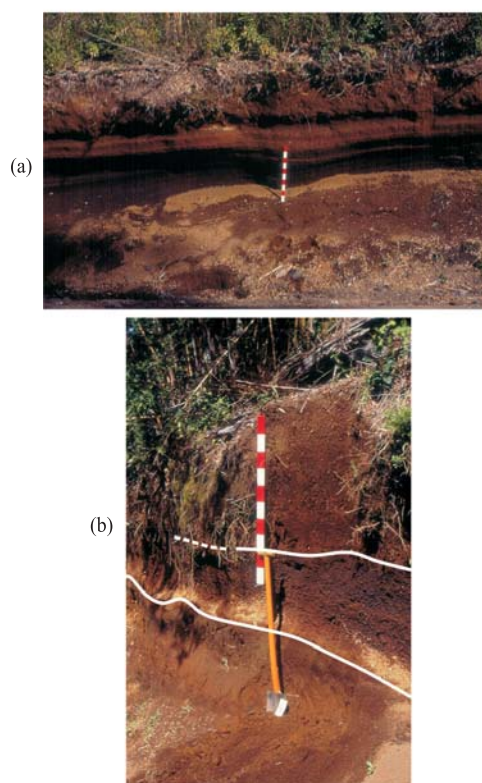


Figura 9. (a) Depósitos piroclásticos nas encostas do Vulcão Villarica, sul do Chile; (b) Perfis de solo desenvolvidos a partir de três depósitos de cinzas vulcânicas no Vulcão Villarica. As linhas brancas indicam as paleosuperfícies (além da atual) onde se desenvolvem os solos. Pelo fato de os depósitos serem muito recentes, tratam-se de solos enterrados e não paleossolos.

pedológicos, sendo eventuais nesses registros sedimentares os solos decapitados. A figura 10 representa as diferentes relações possíveis entre os horizontes pedológicos e a dinâmica sedimentar, ora com predomínio da pedogênese, ora com predomínio da sedimentação. Nessa escala de trabalho, alguns autores (Atkinson, 1986; Prochnow et al., 2005, 2006; Tabor et al., 2006) estão trabalhando com “paleocatenas” em materiais pré-quadernários, indicando a sequência típica de paleossolos em determinadas situações. Apesar de esses casos estudados significarem importante contribuição, esses trabalhos não são comuns, pois raramente encontram-se sequências contínuas de exposição para esse tipo de análise.

Decorrentes das análises sedimentares megascópicas, diversos trabalhos recentes abordam a pedofácies, termo introduzido por Bown & Kraus (1987) para designar a variabilidade lateral dos solos, indicativa de variabilidade lateral de condições ambientais, como umidade do solo, topografia, vegetação, taxa de sedimentação, etc., aplicado aos estudos estratigráficos.

Além da variabilidade espacial, que dificilmente é preservada, tem-se a sequência vertical, que alterna solos e sedimentos, já que outra característica de desenvolvimento dos solos, que se tornarão paleossolos, é a aparente ciclicidade em depósitos continentais (Andreis, 1981). Essa ciclicidade permite a existência de sucessões de paleossolos, sempre que haja algum hiato no processo de sedimentação, e geralmente está associada à diminuição da granulometria dos sedimentos, indicativa de ambiente menos enérgico. Essa situação permitiria que os paleossolos marcassem paleosuperfícies e, portanto, descontinuidades litológicas (Kraus, 1992; Firman, 1994).

A espessura do solo desenvolvido varia conforme os ciclos de deposição/não deposição em determinado local. Para Kraus (1992) e Wright (1992), solos pouco espessos indicam ciclo curto, enquanto perfis muito espessos e mais desenvolvidos indicam grandes hiatos deposicionais, os quais testemunhariam, portanto, discordâncias importantes. Os episódios de não deposição de curta duração estão, na maioria das vezes, relacionados a fatores locais e não causam grandes discordâncias, enquanto os episódios longos estão relacionados a fatores extrínsecos mais abrangentes, como grandes flutuações do nível do mar, atividade tectônica e alterações climáticas regionais (Kraus, 1992).

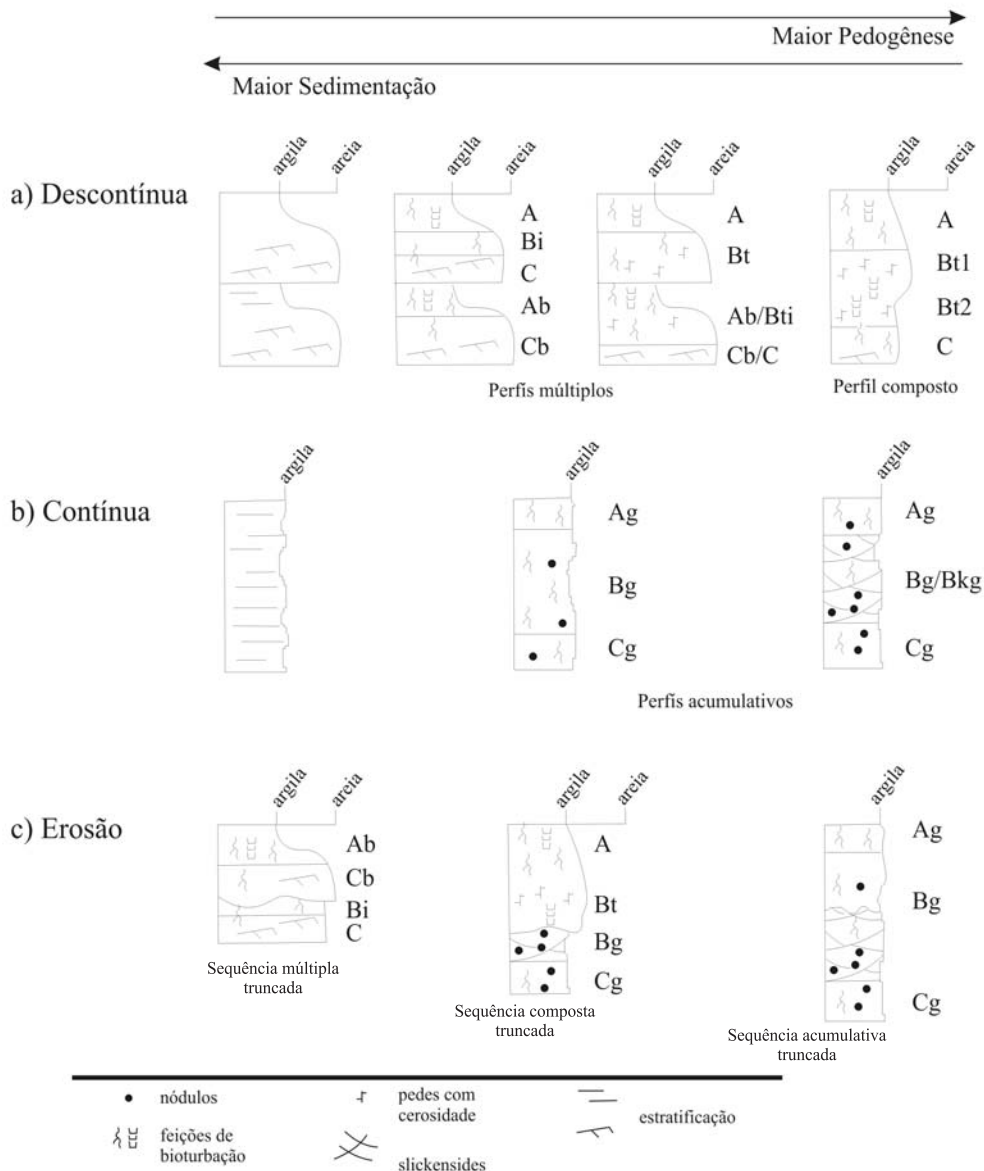


Figura 10. Perfis de sedimentos e solos (paleossolos) refletindo a variação das taxas de pedogênese e sedimentação para condições de deposição (a) descontínua e (b) contínua. Em (c) a sedimentação foi interrompida por um período de erosão. Paleossolos múltiplos predominam quando a sedimentação é descontínua. Perfis fracamente desenvolvidos se formam quando a sedimentação é contínua e rápida; perfis acumulativos são mais desenvolvidos quando as taxas de sedimentação são relativamente mais lentas que as taxas de pedogênese. Com a erosão, uma superfície ou separa dois paleossolos distintos ou é incorporada a um paleossolo em caso de longa duração da pedogênese. Fonte: Kraus (1999).

No entanto, convém assinalar que nem toda descontinuidade geológica é marcada pela presença de paleossolos. Sua ausência pode indicar um curto espaço de tempo de transição entre os eventos degradacional e agradacional, ou ainda que o solo desenvolvido sobre determinada superfície foi totalmente erodido antes de nova fase deposicional.

A presença de um paleossolo associado à discordância, entretanto, pode fornecer importantes informações sobre os eventos deposicionais/erosionais, assumindo relevante importância na análise estratigráfica.

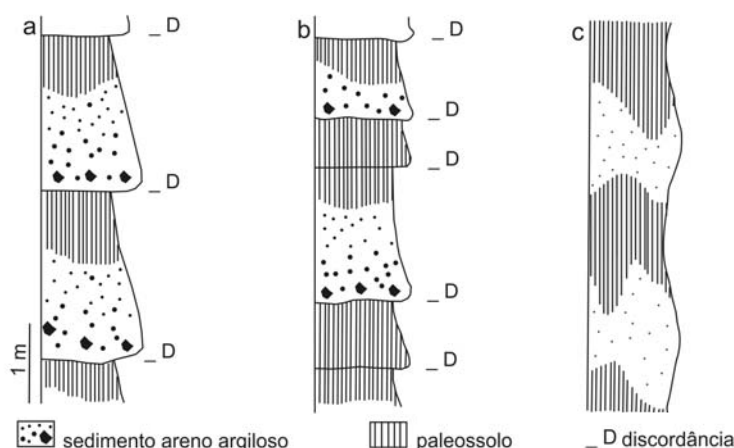
Além dessas observações realizadas em campo, advindas das técnicas sedimentológicas/estratigráficas, outras observações seguem técnicas de descrição da pedologia, configurando-se como as mais importantes se o objetivo for a análise paleopedológica (Andreis, 1981; Retallack, 1990, 1997a). Neste último caso, as descrições de paleossolos, mesmo que litificados, devem conter as informações morfológicas convencionais dos horizontes pedológicos e suas inter-relações, como cor e estrutura, além de caracterizar detalhadamente feições pedológicas, como concreções ou crostas, etc., quando presentes (Andreis, 1981; Retallack, 1990, 1997a). Ademais, observações em campo devem considerar que a relação sedimentação/pedogênese é bastante complexa, uma vez que, além dos processos pedogenéticos envolvidos na formação do solo, ocorrem mais ou menos concomitantemente processos de deposição e erosão, podendo criar uma sequência vertical e lateral de solos superpostos, levando muitas vezes à superposição de processos pedogenéticos, resultando em perfis poligenéticos (Morrison, 1967; Wright, 1992; Kraus, 1992). Para Morrison (1967), os perfis poligenéticos desenvolvem-se quando a taxa de deposição é mais lenta em relação à taxa de pedogênese (Figura 11).

O ambiente deposicional, dessa forma, apresenta papel fundamental na formação/conservação dos paleossolos, daí a importância da interpretação correta dos paleoambientes deposicionais, a qual é fornecida pela combinação das análises sedimentológica, estratigráfica e paleopedológica. Uma análise completa permite identificar qual o ambiente que gerou a deposição dos sedimentos e, portanto, não gerou solos, e vice-versa.

Sintetizando, como destaca Andreis (1981), há um consenso acerca dos fatores relevantes para as análises de paleossolo: (a) as propriedades macroscópicas e sua descrição são essenciais para a identificação de um paleossolo em campo; (b) para ser considerado um paleossolo, um determinado “estrato” deve apresentar mais de uma característica pedogênica ou horizontes distintos; (c) é indispensável a combinação de informações de campo com as de laboratório, especialmente a micromorfologia, a fim de se obter a caracterização completa dos paleossolos; (d) salvas as modificações produzidas pela diagênese, os paleossolos apresentam características macroscópicas e microscópicas semelhantes às encontradas em solos atuais, ou seja, devem ser estudados pelos mesmos métodos adotados na pedologia.

CONSIDERAÇÕES

1. Observa-se na literatura internacional que os estudos na área de paleopedologia estão aumentando de forma significativa nos últimos anos e que, recentemente, a literatura nacional dá sinais de que começa também a caminhar nesse sentido. Entretanto, deve-se ressaltar que a grande maioria dos trabalhos referentes a essa temática, no Brasil, apresenta



- a) cada discordância, no topo de uma sequência de depósitos, apresenta um perfil de paleossolo correspondente.
- b) a pequena espessura de algumas das sequências de depósito promovem uma sobreposição de paleossolos, gerando perfis poligenéticos.
- c) a deposição é contínua e com pouca quantidade de sedimentos. Neste caso a velocidade da pedogênese pode, em alguns momentos, ser maior que a velocidade de deposição, não gerando discordâncias nítidas ou limites claros no paleossolo.

Figura 11. Ciclotema sedimento-pedogenético. Fonte: Meyer (1987).

especialmente um cunho geológico, sendo relativamente raras análises mais aprofundadas sobre os processos (paleo)pedogenéticos.

2. O princípio do atualismo pode ser utilizado, porém com extrema cautela, na reconstituição de paleoambientes, pois normalmente apenas parte da paisagem é preservada com seus respectivos paleossolos, sobretudo as posições mais rebaixadas desta. Além disso, a composição da atmosfera foi muito dinâmica durante o tempo geológico, o que influenciou sobremaneira os processos pedogenéticos.

3. Outra situação que merece cuidado nos estudos de paleossolos é a sua correlação lateral. Somente em situações muito específicas é preservada toda uma topografia, e ela permanece exposta com grande expressão lateral (geralmente apenas em áreas áridas e montanhosas), o que dificulta a análise em catenas. Correlações laterais são difíceis, portanto deve-se dar preferência ao estudo dos paleossolos em seções perfeitamente verticais (se necessário, com técnicas de montanhismo), em razão da grande variabilidade de perfis de solos numa mesma vertente. Assim, tem-se a sucessão dos paleossolos e respectivos ambientes num determinado ponto e a sucessão temporal desses.

4. Finalmente, destaca-se a importância dos paleossolos nos estudos paleoclimáticos, por constituírem importante ferramenta para a interpretação de variações paleoclimáticas, permitindo contribuições significativas para a modelagem de mudanças climáticas futuras.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Marcilene dos Santos, pela leitura crítica e pelas sugestões, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de produtividade.

LITERATURA CITADA

- ALGEO, T.J.; SCHECKLER, S.E. & MAYNARD, J.B. Effects of the middle to late devonian spread of vascular land plants on weathering regimes, marine biotas, and global climate. In: GENSEL, P.G. & EDWARDS, D., eds. *Plants invade the land: Evolutionary & environmental perspectives*. New York, Columbia University Press, 2001. 213-236.
- ANDREIS, R.R. Identificación e importancia geológica de los Paleosuelos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981. 67p.
- ATKINSON, C.D. Tectonic control on alluvial sedimentation as revealed by an ancient catena in the Capella Formation (Eocene) of Northern Spain. In: WRIGHT, V.P., ed. *Paleosols: Their recognition and interpretation*. Princeton, Princeton University Press, 1986. p.139-179.
- BERNER, R.A. The rise of trees and their effects on Paleozoic atmospheric CO₂ and O₂. *Compte Rendus Geoscience*, 335:1173-1177, 2003.
- BOUCOT, A.J. & GRAY, J. A critique of Phanerozoic climatic models involving changes in the CO₂ content of atmosphere. *Earth Sci. Rev.*, 56:1-159, 2001.
- BOWN, T.M. & KRAUS, M. Integration of channel and floodplains suites, I. developmental sequence and lateral relations of alluvial paleosols. *J. Sedim. Petrol.*, 57:587-601, 1987.
- BRADLEY, R.S. *Paleoclimatology: Reconstituting climates of quaternary*. Amsterdam, Elsevier, 1999. 610p.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCracken, R.J. & SOUTHARD, R.J. *Soil genesis and classification*. Ames, Iowa State University Press, 1997. 527p.
- CATT, J.A. Paleosols. *Progress in Physical Geography*, 11: 487-510, 1987.
- DAVIES, N.S. & GIBLING, M.R. Cambrian to devonian evolution of alluvial systems: The sedimentological impact of the earliest land plants. *Earth Sci. Rev.*, 98:171-200, 2010.
- DRIESE, S.G. & MORA, C.I. Diversification of siluro-devonian plant traces in paleosols on estimates of paleoatmospheric CO₂ levels. In: GENSEL, P.G. & EDWARDS, D., eds. *Plants invade the land: Evolutionary & environmental perspectives*. New York, Columbia University Press, 2001. p.237-253.
- FIRMAN, J.B. Paleosoils in laterite and silcrete profiles evidence from the South East Margin of the Australian Precambrian Shield. *Earth Sci. Rev.*, 36:149-179, 1994.
- FRENCH, C. *Geoarchaeology in action: Studies in soil micromorphology and landscape evolution*. London, Routledge Press, 2003. 291p.
- FRIMEL, H.E. Archaean atmospheric evolution: Evidence from the Witwatersrand gold fields, South Africa. *Earth Sci. Rev.*, 70:1-46, 2005.
- GOLBERY, R. Laterization and groundwater alteration phenomena in the Triassic Budra Formation, south-western Sinai. *Sedimentology*, 31:575-594, 1984.
- GOLBERY, R. Palaeosols of the lower jurassic mishhor and ardon formations ("Laterite Derived Facies"), Makhtesh Ramon, Israel. *Sedimentology*, 29:669-690, 1982.
- GOLDBERG, P. & MACPHAIL, R.I. *Practical and theoretical geoarchaeology*. Oxford, Wiley-Blackwell, 2006. 472p.
- HOLLIDAY, V.T. *Soils in archaeology: Land evolution and human occupation*. Washington, Smithsonian Institution Press, 1992. 254p.
- HUNT, C.B. *Geology of soils – Their evolution, classification and uses*. São Francisco, W. F. Freeman, 1972. 344p.
- JENNY, H. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. New York, Dover Publications, 1994. 281p.

- KRAUS, M. Alluvial response to differential subsidence: Sedimentological analysis aided by remote sensing, Wilwood Formation (Eocene), Bighorn Basin, Wyoming, USA. *Sedimentology*, 39:455-470, 1992.
- KRAUS, M. Paleosols in clastic sedimentary rocks: Their geologic applications. *Earth Sci. Rev.*, 47:41-70, 1999.
- KUMAR, A. Palaeolatitudes and age of Indian Laterites. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 53:145-160, 1986.
- MABESOONE, J.M. & LOBO, H.M.C. Paleosols as stratigraphic indicators for the cenozoic history of northeastern Brazil. *Catena*, 7:67-78, 1980.
- MEYER, R. Paléolaterites et paléosols. Orleans, BRGM, 1987. 163p.
- MINTZ, J.S.; DRIESE, S.G. & WHITE, J.D. Environmental and ecological variability of Middle Devonian (Givetian) forests in Appalachian Basin Paleosols. New York, United States. *Palaaios*, 25:85-96, 2010.
- MORRISON, R.B. Principles of quaternary stratigraphy. In: MORRISON, R.B. & WRIGHT, H.E., eds. Quaternary soils. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF QUATERNARY RESEARCH, 7., Reno, 1967. Proceedings... Reno, 1967.v.9. p.1-69.
- OLLIER, C. & PAIN, C. Regolith, soils and landforms. Chichester, Wiley, 1996. 316p.
- OLLIER, C.D. Laterite profiles, ferricrete and landscape evolution. *Z. Geomorphol.*, 35:165-173, 1991.
- PARRISH, J.T. Interpreting pre-quaternary climate from the geologic record. New York, Columbia University Press, 1998. 338p.
- PETROV, V.P. The nature of thick zones of paleoweathering. *Intern. Geol. Rev.*, 33:49-61, 1991.
- PILLANS, B. Regolith geochronology and landscape evolution. Bentley, CRC LEME, 2006. 94p. (Report, 189)
- PROCHNOW, S.J.; NORDT, L.C.; ATCHLEY, S.C. & HUDEC, M.R. Multi-proxy paleosol evidence for middle and late Triassic climate trends in eastern Utah. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 232:53-72, 2006.
- PROCHNOW, S.J.; NORDT, L.C.; ATCHLEY, S.C.; HUDEC, M.R. & BOUCER, T.E. Triassic paleosol catenas associated with a salt-withdrawal minibasin in southeastern Utah, USA. *Rocky Mountain Geol.*, 40:25-49, 2005.
- QUEIROZ NETO, J.P. Solos e paleossolos do Estado de São Paulo e suas interpretações paleogeográficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v.3. p.173-181.
- RAPP Jr., G. & HILL, C.L. Geoarchaeology: The earth-science approach to archaeological interpretation. New Haven, Yale University Press, 1998. 274p.
- RETALLACK, G. J. A colour guide to paleosols. Chichester, Wiley, 1997a. 175p.
- RETALLACK, G.J. Early forest soils and their role in Devonian global change. *Science*, 276:583-585, 1997b.
- RETALLACK, G. J. Soils of the past – An introduction to paleopedology. London, Unwin Hyman, 1990. 520p.
- RETALLACK, G.J. Core concepts of paleopedology. *Quater. Inter.*, 51/52:203-212, 1998.
- RETALLACK, G.J. Miocene paleosols and Ape Habitats of Pakistan and Kenya. Oxford, Oxford University Press, 1991. 346p.
- RETALLACK, G.J. The fossil record of soils. In: WRIGHT, V.P., ed. Paleosols: Their recognition and interpretation. Princeton, Princeton University Press, 1986. 1-57.
- RUELLAN, A. Classification of pedological systems: A challenge for the future of soil science. *Ann. Agr. Sci.*, 3:24-28, 2005.
- RUELLAN, A. The history of soils: Some problems of definition and interpretation. In: YAALON, D. H., ed. Paleopedology: Origin, nature and dating of paleosols. Jerusalem, Israel Universities Press, 1971. p.3-13.
- RYE, R. & HOLLAND, H.D. Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen: A critical review. *Am. J. Sci.*, 298:621-672, 1998.
- SCHAEFER, C. & DALRYMPLE, J. Landscape evolution in Roraima, North Amazonia: Planation, paleosols and paleoclimates. *Z. Geomorphol.*, 39:1-28, 1995.
- SHELDON, N.D. & TABOR, N.J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth Sci. Rev.*, v.95, n.1-2, p.1-52, 2009.
- STEIN, J.K. & FARRAND, W.R. Sediments in archaeological context. Salt Lake City, The University of Utah Press, 2001. 218p.
- SUGUIO, K. Formação Bauru. Calcários e sedimentos detríticos associados. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1973. 236p. (Tese de Livre Docência)
- TABOR, N.J.; MONTAÑEZ, I.P.; KELSO, K.A.; CURRIE, B.; SHIPMAN, T. & COLOMBI, C. A Late Triassic soil Catena: Landscape and climate controls on paleosol morphology and chemistry across the Carnian-age Ischigualasto-Villa union basin, northwestern Argentina. In: ALONSO-ZARZA, A.M. & TANNER, L.H., eds. Paleoenvironmental record and applications of calcretes and palustrine carbonates. Boulder, Geological Society of America, 2006. p.17-41. (Special Paper, 416)
- TARDY, Y. & ROQUIN, C. Dérive des continents: Paléoclimats et alterations tropicales. Orléans, BRGM, 1998. 473p.
- THOMAS, B.A. & SPICER, R.A. The evolution and Palaeobiology of land plants. London, Croom Helm, 1987. 318p.
- WILSON, R.C.L., ed. Residual deposits: Surface related weathering processes and materials. Oxford, Blackwell, 1983. 258p.
- WRIGHT, V.P. Paleopedology: Stratigraphic relationship and empirical models. In: MARTINI, I.P. & CHESWORTH, W., eds. Weathering, soils e paleosols. Amsterdam, Elsevier, 1992, p.475-499.

- YAALON, D.H., ed. Paleopedology: Origin, nature and dating of paleosols. Jerusalem, Israel Universities Press, 1971. 350p.
- ZEESE, R. Tertiary weathering profiles in Central Nigeria as indicators of paleoenvironmental conditions. *Geomorphology*, 16:61-70, 1996.