



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

MAFRA, A. L.; SILVA, E. F.; COOPER, M.; DEMATTÊ, J. L. I.  
PEDOGÊNESE DE UMA SEQÜÊNCIA DE SOLOS DESENVOLVIDOS DE ARENITO NA REGIÃO DE  
PIRACICABA (SP)

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 25, núm. 2, 2001, pp. 355-369

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218429013>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# **PEDOGÊNESE DE UMA SEQUÊNCIA DE SOLOS DESENVOLVIDOS DE ARENITO NA REGIÃO DE PIRACICABA (SP)<sup>(1)</sup>**

**A. L. MAFRA<sup>(2)</sup>, E. F. SILVA<sup>(3)</sup>, M. COOPER<sup>(4)</sup> & J. L. I. DEMATTÊ<sup>(5)</sup>**

## **RESUMO**

O trabalho abordou a formação de solos com horizonte B textural e teve por objetivo identificar os processos pedogenéticos envolvidos na formação de lamelas, do gradiente textural abrupto, assim como suas implicações sobre os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo. O estudo foi desenvolvido numa topossequência de solos derivados de arenito: o perfil (P1), ocorrendo na parte alta do relevo (topo); perfil (P2), na faixa intermediária (terço médio da encosta), e perfil (P3), no terço inferior da encosta. As análises realizadas foram: granulométrica, química, mineralógica e micromorfológica. Os perfis apresentaram sequência de horizontes do tipo A-E-Bt, tendo sido classificados como Alissolos Crômicos. Os solos foram classificados como quimicamente ácidos, com mineralogia da fração argila mostrando predomínio de caulinita. Os materiais analisados evidenciaram uniformidade quanto à granulometria, diâmetro médio, arredondamento e relação zircão/turmalina das areias, assim como no aspecto morfológico, apontando para formação autóctone do solo. Os processos pedogenéticos responsáveis pela formação do gradiente textural foram a degradação das argilas em condições de oxirredução e a lessivagem. O primeiro processo foi constatado em microdomínios no contato E/Bt, onde se notaram cores de gleização, indicando encharcamento temporário. Neste caso, a formação do horizonte alábico deveu-se principalmente à destruição do topo do horizonte Bt. As lamelas nada mais seriam do que heranças do horizonte Bt no horizonte alábico. A presença de cerosidade, associada aos cutãs de iluviação no exame micromorfológico, revelou a participação do processo de lessivagem contribuindo para a diferenciação textural.

**Termos de indexação: B textural, ferrólise, lessivagem, micromorfologia, mineralogia, pedologia.**

<sup>(1)</sup> Trabalho apresentado no 27º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Brasília, 1999. Recebido para publicação em fevereiro de 2000 e aprovado em dezembro de 2000.

<sup>(2)</sup> Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista CNPq. E-mail: allmafra@carpa.ciagri.usp.br

<sup>(3)</sup> Pesquisador Doutor da Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico 1024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro (RJ). Bolsista CNPq. E-mail: enio@cnps.embrapa.br

<sup>(4)</sup> Professor Doutor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: mcooper@carpa.ciagri.usp.br

<sup>(5)</sup> Professor Titular aposentado do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP.

**SUMMARY:** *PEDOGENESIS OF A SOIL SEQUENCE DEVELOPED ON SANDSTONE IN PIRACICABA (SP)*

*The formation of soils with argillic horizons was investigated to identify the pedological processes involved in the formation of lamellae and the abrupt textural gradient as well as their implication on the soil physical, chemical and mineralogical attributes. This study was carried out on a sandstone-derived soil toposequence, with profile (P1) occupying the higher part of the landscape (summit), profile (P2) on the backslope, and profile (P3) on the footslope. Soil chemical, mineralogical, micromorphological and particle size distribution analyses were performed. The profiles presented an A-E-Bt horizon sequence, being classified as Hapludults. The soils were acid, with clay mineralogy dominated by kaolinite. The analyzed materials evidenced uniformity in relation to particle size distribution, average diameter, roundness and sand fraction zircon/turmaline relation, as well as uniform morphological aspects, showing the autochthonous origin of these soils. The pedogenetic processes responsible for the abrupt textural gradient are clay degradation under oxi-reduction conditions and lessivage. The first process is evidenced by micro-domains at the E/Bt contact, where gleization colors can be seen, indicating temporary water saturation conditions. In this case, the formation of the albic horizon is due to the destruction of the top of the Bt horizon. The lamellae would be an inheritance of the Bt horizon in the albic horizon. The presence of illuvial clayskins, associated to argillans observed in the micromorphological studies, suggested a contribution of the lessivage process to textural gradient formation.*

*Index terms:* argillic horizon, ferrollysis, illuviation, micromorphology, mineralogy, pedology.

## INTRODUÇÃO

O incremento em argila no horizonte B em relação à porção superior do perfil é um fenômeno comum em muitos solos, sendo utilizado na classificação, caracterizando principalmente as ordens dos Ultissolos e Alfissolos na classificação americana ("Soil Taxonomy") (EUA, 1998). No sistema brasileiro de classificação, esses solos são enquadrados no primeiro nível categórico, em ordens como Alissolos, Argissolos, Luvisolos e outros (EMBRAPA, 1999), que são solos amplamente distribuídos em várias superfícies geomórficas (West et al., 1998).

Na região de Piracicaba (SP), os solos com horizonte B textural são abundantes e muitos deles que mostram gradiente abrupto têm grande desenvolvimento dos horizontes superficiais arenosos (A e E), que, quando maiores que 50 cm de espessura, são chamados de arênicos, podendo apresentar mais de 100 cm de espessura, especialmente nas porções mais elevadas da paisagem (Silva, 2000). Estes solos vêm sendo intensamente utilizados em fins agrícolas, o que requer manejo apropriado, considerando a alta susceptibilidade à erosão e suas particularidades químicas e físico-hídricas (Fiorio, 1998).

Com vistas em identificar os atributos e os processos genéticos relacionados com a formação do gradiente textural nesses solos estudos têm sido desenvolvidos em áreas com rochas sedimentares nessa região (Prado, 1986; Dechen et al., 1993; Vidal Torrado, 1994; Calero Merino, 1999).

O desenvolvimento do gradiente textural no perfil de solo pode estar ligado a dois grupos de processos (Buol et al., 1997). O primeiro deles é de natureza litológica ou sedimentar, podendo-se citar a presença de estruturas com constituição diferenciada na rocha mãe, o coluviamento de material grosseiro na superfície ou, ainda, a erosão superficial seletiva das partículas finas. Nestes casos, os materiais de origem do solo apresentariam desuniformidade original, que seria herdada ao solo. O outro grupo de processos é de ordem pedogênica, podendo-se citar a migração descendente de argila do horizonte A para o B pelo processo de lessivagem ou argiluviação. Este é um dos processos pedogenéticos mais comuns e destacados nos sistemas de classificação de solos (Eswaran & Sys, 1979; Nettleton et al., 1987).

O gradiente textural pode ainda ser resultante de outros processos pedogenéticos, como a degradação das argilas no horizonte A ou E em condições alternadas de oxidação e redução e pHs do solo extremamente ácidos, conhecida por ferrólise (Brinkman, 1970), ou a formação "*in situ*" das argilas, a partir do intemperismo de minerais primários presentes no horizonte Bt. A diferenciação entre estes dois grupos de processos normalmente envolve os estudos de uniformidade do material de origem.

O objetivo do presente estudo foi identificar os processos envolvidos na formação do gradiente textural abrupto numa sequência de solos, visando diferenciar aqueles de natureza litológica ou sedimentar daqueles de ordem pedogênica, por meio da caracterização e interpretação dos atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos.

## MATERIAL E MÉTODOS

A sequência de solos estudada situa-se na microbacia do Ceveiro, em Piracicaba (SP), onde predominam terrenos com relevo suave ondulado a ondulado, com declividade de 0,05 a 0,15 mm<sup>-1</sup> e altitude entre 460 e 580 m. O material de origem do solo é constituído de arenitos da Formação Pirambóia, do Triássico-Jurássico (IPT, 1981). O clima é mesotérmico úmido subtropical com inverno seco, Cwa, segundo a classificação de Köppen. O balanço hídrico dos solos da região mostra déficit hídrico de junho a outubro e excesso de água de novembro a maio (Brasil, 1960). A vegetação original da região é floresta tropical subcaducifolia, que foi, em grande parte, removida pelo avanço da agricultura nas últimas décadas, sendo a cana-de-açúcar a principal cultura (Fiorio, 1998).

A morfologia dos solos foi descrita numa topossequência, em três trincheiras localizadas no topo (P1), no terço médio da encosta (P2) e no terço inferior da encosta (P3), a qual se encontra próxima ao afloramento da rocha (arenito). Os horizontes pedogênicos, cor, textura, estrutura e consistência dos materiais foram identificados de acordo com Lemos & Santos (1996). A micromorfologia do solo no contato entre o material arenoso subsuperficial (horizonte E) e o horizonte Bt e no horizonte CR subjacente foi descrita em lâminas delgadas, obtidas a partir de amostras indeformadas (Castro, 1985), seguindo-se a terminologia apresentada por Bullock et al. (1985). A distribuição do plasma nestes materiais foi também identificada pelo exame em microscópio eletrônico de varredura, modelo Jeol KGM 5600LV, acoplado à microsonda Noran, com detector de fluoreto de lítio. As amostras foram recobertas com ouro num evaporador Daton Vacuum Desk II.

A granulometria do solo foi obtida pelo método do densímetro, em amostras dispersas com hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio (Camargo et al., 1986). As areias foram separadas em quatro frações: (a) grossa, de 2,0 a 0,5 mm; (b) média, de 0,5 a 0,25 mm; (c) fina, de 0,25 a 0,1 mm e (d) muito fina, de 0,1 a 0,05 mm.

As determinações químicas foram: pH em água e CaCl<sub>2</sub>, carbono orgânico, P, Ca + Mg, K, Al, H + Al e CTC (Raij & Quaggio, 1983). Os teores de Si, Al, Fe e Ti foram determinados em extrato de solo submetido ao ataque sulfúrico, a partir dos quais foi calculado o índice Ki (Camargo et al., 1986).

Os minerais da fração areia muito fina foram separados em leves e pesados por imersão em bromofórmio, confeccionando-se lâminas para identificação das frequências ao microscópio óptico, contando-se 100 grãos por amostra (EMBRAPA, 1997). A mineralogia das frações silte e argila foi caracterizada por difração de raios-X, utilizando-se equipamento Rigaku com tubo de cobre e filtro de

níquel, operado a 30 mA e 40 kV, com velocidade de 2°2θ por minuto. As amostras foram previamente submetidas à eliminação de matéria orgânica e óxidos de ferro. O silte foi, em seguida, separado por centrifugação, em amostras dispersas com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, montado na forma de pó e irradiado de 5 a 60°2θ. As argilas foram saturadas com potássio e magnésio e irradiadas de 3 a 30° 2θ na forma orientada à temperatura ambiente, tratadas com etileno-glicol e aquecidas a 350 e 550°C (Jackson, 1969; Camargo et al., 1986). A identificação dos minerais foi feita de acordo com as distâncias interplanares (Brown & Brindley, 1980; Moore & Reynolds, 1989).

Os critérios empregados na avaliação da uniformidade dos materiais do solo e a filiação ao arenito foram os índices e parâmetros estatísticos da distribuição granulométrica, tais como: diâmetro médio, amplitude, assimetria e curtose das areias, a relação areia fina/areia total e a relação zircão/turmalina. O diâmetro médio, amplitude (média ± desvio-padrão), assimetria e curtose foram calculados para as frações de areias de acordo com Folk & Ward (1957), empregando-se o programa "Phi" (Jong van Lier & Vidal-Torrado, 1992).

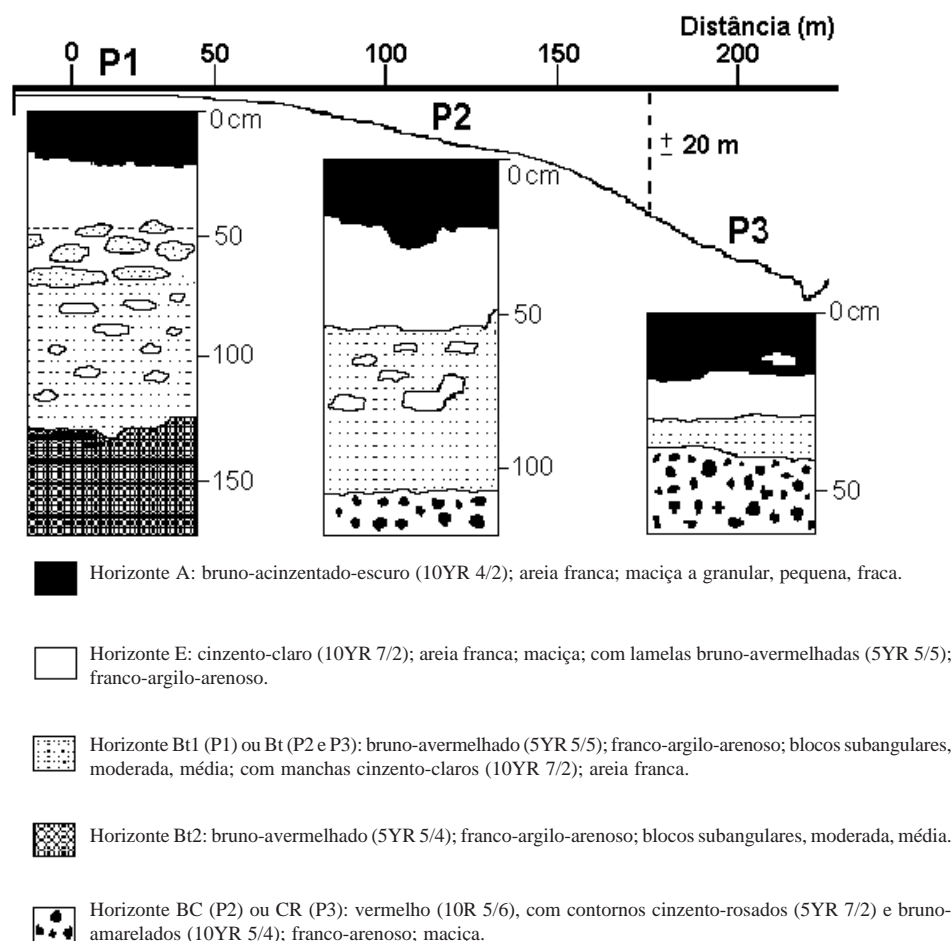
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Morfologia e classificação dos solos

Os solos apresentam horizontes A-E-Bt-CR, com textura arenosa/média e relação textural abrupta. Há uma concordância na distribuição desses horizontes na encosta, com maior espessura dos conjuntos, eluvial (E) e textural (Bt), no topo da sequência (perfil P1), reduzindo-se no terço médio da encosta (perfil P2) e tornando-se mais rasos no terço inferior da encosta (perfil P3) (Figura 1).

O perfil P1 foi classificado como Alissolo Crômico Argilúvico abrupto epi-eutrófico (EMBRAPA, 1999), porém, por apresentar horizontes A + E > 50 cm, e portanto arênico, sugere-se a criação da classe Alissolo Crômico Argilúvico arênico no 4º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Este perfil foi enquadrado no "Soil Taxonomy" como "Arenic Hapludult, sandy over loamy, kaolinitic" (EUA, 1998). O horizonte E apresenta lamelas bruno-avermelhadas, com textura franco-argilo-arenosa, semelhantes ao horizonte Bt subjacente. No horizonte Bt, destaca-se a presença de cerosidade comum e moderada na superfície de agregados e em torno de poros de circulação de água. A estrutura deste é moderada, média, em blocos subangulares.

O perfil P2, situado no terço médio da encosta, foi classificado como Alissolo Crômico Argilúvico abrupto epi-distrófico, correspondendo a um "Typic Hapludult, sandy over loamy, kaolinitic", com horizonte Bt mais amarelado (10YR 5/6) em relação



**Figura 1. Representação esquemática da macromorfologia do solo na sequência desenvolvida sobre arenito.**

ao topo. A estrutura do horizonte Bt é moderada, muito grande, em blocos subangulares. Este material apresenta cerosidade comum e moderada, tornando-se comum e forte no horizonte BC subjacente.

O contato entre os horizontes E e Bt nesses solos é marcado pela presença de domínios arenosos claros e por pontuações acinzentadas no topo do horizonte Bt, mais nítidas e abundantes no perfil P1 do topo da sequência.

No terço inferior da encosta, o perfil P3 foi classificado como Alissolo Crômico Argilúvico abrupto, correspondente a "Ochreptic Hapludult, sandy over loamy, kaolinitic, shallow" na classificação americana. Assim como no perfil P1, para o perfil P3, sugere-se, também, a criação de uma nova classe no 4º nível categórico, Alissolo Crômico Argilúvico câmbico, por apresentar horizontes A + Bt < 50 cm. Neste perfil, o horizonte Bt disposto sobre a rocha mostra estrutura fraca, média, em blocos angulares. Este material apresenta bolsões arenosos dispostos preferencialmente na horizontal, que podem ser

interpretados como estádios anteriores ao desenvolvimento das lamelas. A alterita na base deste perfil é vermelha e coesa, apresentando volumes centimétricos arredondados, circundados por uma camada arenosa de alteração, nitidamente mais clara (cinzento-rosada). É comum a alterita apresentar, em regiões mais argilosas, espessura milimétrica, semelhante a microlamelas com cutãs. O material adjacente é bruno-amarelado, mais argiloso, com cerosidade comum, moderada a forte. Essa organização dos materiais no contato entre o horizonte Bt e CR evidencia semelhanças com a disposição vertical dos horizontes E e Bt desses perfis.

#### Aspectos micromorfológicos

No contato entre os horizontes E/Bt1, observa-se a coexistência de microdomínios arenosos com microestrutura em grãos simples e trama chitônica, juntamente com materiais mais compactos, com microestrutura em blocos subangulares, os quais



apresentam trama gefúrica (Quadro 1). A transição entre esses microdomínios é gradual e nota-se a presença de estruturas enriquecidas em plasma completamente circundadas pelo material arenoso (Figura 2a), o que se assemelha às feições macromorfológicas observadas neste material, com a disposição em ilhas ou volumes isolados do horizonte argílico no contato com o albico sobrejacente. Dentre as feições pedogênicas, destacam-se os cutãs de iluviação, abundantes, constituídos por ferrãs e ferriargilãs.

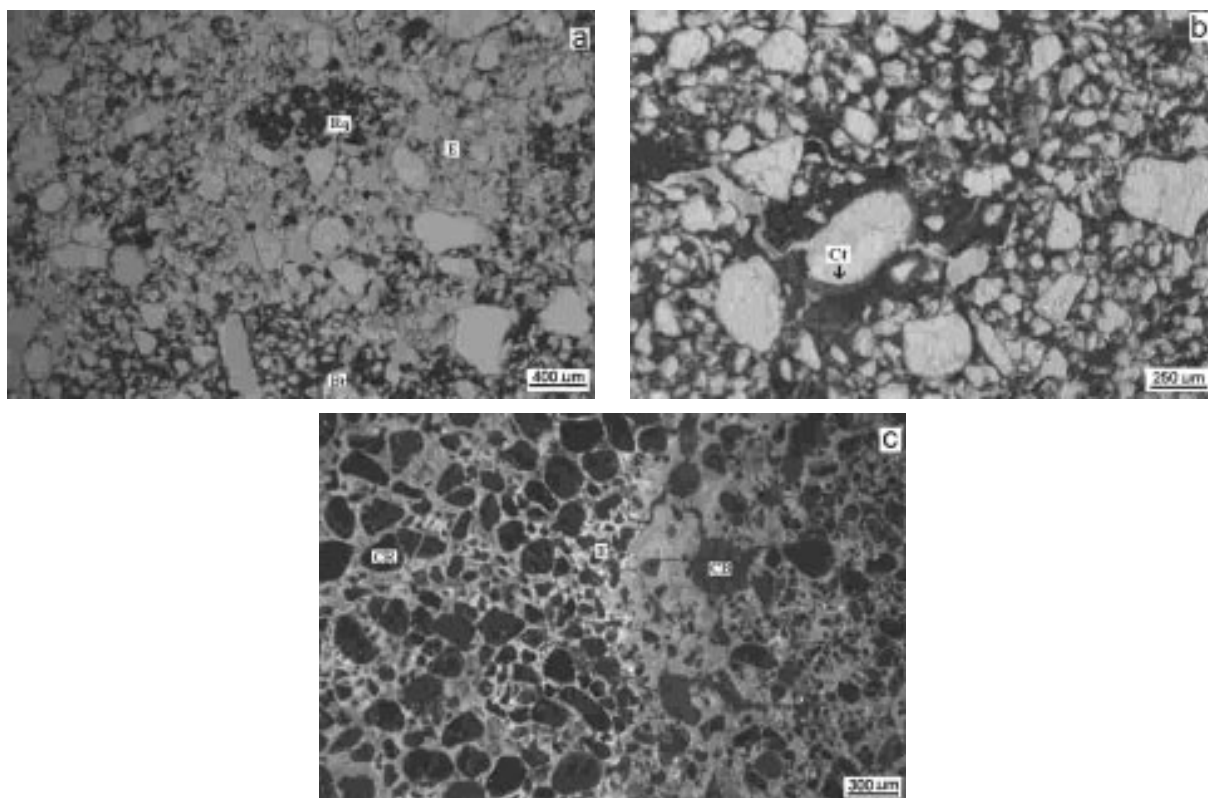
O horizonte Bt1 é bastante homogêneo, apresentando uma microestrutura granular compacta, com blocos subangulares e trama gefúrica. O plasma é amarelado, com birrefringência do tipo poroestriada, granoestriada e reticulada. As feições

pedogênicas são representadas por ferriargilãs e ferrãs, pouco comuns (Figura 2b), que podem apresentar estrias de segregação de ferro.

No horizonte CR, evidencia-se a alterita manchada, apresentando um alteroplasma vermelho isótico, com leve birrefringência granoestriada e poroestriada, justaposta a um material bruno-amarelado, que tem microestrutura em blocos subangulares pequenos e pouco desenvolvidos. Nestes domínios, o plasma tem maior birrefringência, que é do tipo poroestriada, monoestriada e granoestriada. Os cutãs de iluviação aí encontrados são do tipo argilãs moderadamente abundantes. A transição entre a alterita e os volumes bruno-amarelados é abrupta e marcada por uma faixa de transição arenosa e clara com cerca de 0,5 a 1,0 mm de espessura (Figura 2c).

**Quadro 1. Atributos micromorfológicos de alguns horizontes estudados nos solos desenvolvidos sobre arenito**

Atributo	Horizonte		
	E/Bt1	Bt1	CR
Geral	Duas zonas: A) ocupando 30% da lâmina menos densa e B) 70% da mais densa; Transição gradual	Lâmina homogênea com uma zona só	Duas zonas: A) ocupando 40% da lâmina; bruno-amarelada, e B) ocupando 60% da lâmina; bruno-avermelhada; Transição abrupta
Microestrutura	A) apedal, empilhamento de grãos, e B) Granular compacta, blocos subangulares (200-300 µm); pedalidade moderada a fraca	Granular compacta, com blocos subangulares pequenos (300-400 µm); Pedalidade moderada	A) blocos subangulares pequenos (100-400 µm), pedalidade moderada, e B) blocos subangulares pequenos (100-400 µm) em formação, pedalidade fraca
Plasma	A) bruno-amarelado-escuro; birrefringência granoestriada; e B) bruno- amarelado; birrefringência reticulada	Plasma amarelado, birrefringência poroestriada, granoestriada e reticulada.	A) bruno-amarelado; birrefringência poroestriada, monoestriada e granoestriada, e B) bruno-avermelhado; Isótico, leve birrefringência granoestriada e poroestriada
Esqueleto e trama	A) quartzo (100%), mal selecionado, 50-400 µm; subarredondado; trama chitônica, e B) quartzo (100%); 30-500 µm; mal selecionado, subarredondado; trama gefúrica	Quartzo (100%); mal selecionado; 30-500 µm; subarredondado e subangular; Trama gefúrica	A) quartzo (100%), mal selecionado, subarredondado e subangular; 50-500 µm; trama gefúrica, e B) quartzo (98%); moderadamente selecionado, subarredondado; 30-500 µm. Trama chitônica
Poros	A) poros de empilhamento e cavidades; B) Cavidades dominantes (300-1.000 µm), canais, poucas fissuras	Cavidades e canais, algumas microfissuras separando os agregados	A) Fissuras dominantes, e B) Cavidades dominantes, de empilhamento; poucas fissuras
Feições	A) poucos cutãs de iluviação; amarelados, e B cutãs de iluviação) abundantes; amarelados; ferrãs e ferriargilãs com estrias pretas de segregação de ferro; cutãs fissurados por contração e expansão	Poucos ferriargilãs (1%), alguns modificados com orientação manchada; algumas estrias pretas de segregação de ferro; poucos ferrãs (1%); nódulos pequenos ferruginosos	A) cutãs de iluviação, amarelados, moderadamente abundantes, alguns modificados por contração e expansão, e B) alguns ferrãs localizados em poros pequenos



**Figura 2. Micrografias de alguns materiais presentes nos solos estudados: (a) contato E/Bt1 (P1) evidenciando material argiloso formando uma relíquia (Rq) no centro da amostra, com aspecto semelhante ao horizonte Bt adjacente, circundando por material arenoso; (b) horizonte Bt1 (P1) evidenciando cutãs (Ct) em torno de uma cavidade; (c) horizonte CR (P3) evidenciando o aspecto mais ferruginizado da rocha (CR), com um material arenoso intermediário (E) e o material de alteração bruno-amarelado (CB) à direita**

O exame ao microscópio eletrônico de varredura dos volumes mais argilosos, que compõem as lamelas presentes no horizonte E do perfil P1, revela a presença de plasma argiloso preenchendo os espaços intergranulares, disposto, em muitos casos, na forma de estruturas laminares (Figura 3a), mostrando a deposição de argilas em suspensão, possivelmente em decorrência do fluxo hídrico vertical ou lateral. No horizonte Bt, pode-se verificar a ocorrência de revestimentos de argila ou cutãs em torno de um poro tubular (Figura 3b), correspondente às estruturas de cerosidade constatadas no exame macromorfológico desses horizontes argílicos. Neste caso, a massa de partículas finas apresenta microfissuras, onde se observam estruturas laminares, muitas das quais paralelas à parede do canal (Figura 3c). O plasma presente nestes revestimentos compõe uma massa uniforme, com superfície lustrosa e espessura de 10 a 30  $\mu\text{m}$ , moldada em muitas porções, provavelmente pela contração e expansão das partículas em virtude do ressecamento e umedecimento (Figura 3d). A

composição química desse plasma, analisado pela microsonda, indicou uma proporção Si/Al semelhante à caulinita.

### **Granulometria e atributos químicos dos solos**

Os solos estudados são arenosos em superfície, com incremento de argila no horizonte Bt, chegando a 310  $\text{g kg}^{-1}$ , caracterizando gradiente textural abrupto (Quadro 2). As lamelas no horizonte E/Bt1 do perfil P1 apresentam teor de argila semelhante ao do horizonte Bt subjacente. Este acentuado aumento do teor de argila no topo do horizonte Bt estaria ligado à mudança na porosidade, provocando diminuição na condutividade hidráulica do solo, o que poderia explicar o hidromorfismo temporário, constatado na descrição macromorfológica do solo pela ocorrência de domínios descoloridos no topo do horizonte Bt. Este processo de hidromorfia tem sido salientado em outros estudos sobre a formação de solos com gradiente textural (Almeida et al., 1997; Kemp et al., 1998).

**Quadro 2. Granulometria e atributos químicos dos solos desenvolvidos sobre arenito**

Horizonte	Profundidade	Fração granulométrica			pH		P	C <sub>Org</sub> <sup>(1)</sup>	Ataque sulfúrico				Ki
		Areia	Silte	Argila	Água	CaCl <sub>2</sub>			Si	Al	Fe	Ti	
	cm	g kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>						
Perfil 1: Alissolo Crômico Argilúvico arênico abrupto textura arenosa/média													
Ap	0-23	820	100	80	5,6	5,0	66	9,3	10,7	10,8	2,5	2,0	1,9
E	23-46	840	80	80	6,3	5,5	29	8,1	11,8	10,3	4,8	2,2	2,2
E/Bt1	46-75	730	80	190	5,9	5,2	2	8,7	30,1	30,0	6,1	2,4	1,9
Bt1	75-130	710	80	210	4,7	3,9	2	6,4	34,8	32,7	5,7	2,2	2,0
Bt2	130-250+	740	60	200	4,5	3,7	1	5,8	40,4	31,1	8,6	2,9	2,5
Perfil 2: Alissolo Crômico Argilúvico abrupto textura arenosa/média													
Ap	0-22	860	80	60	5,0	4,3	46	8,1	8,0	7,6	4,3	2,8	2,0
E	22-56	880	80	40	4,8	4,0	5	6,4	7,1	9,8	5,1	2,6	1,4
Bt	56-110	610	80	310	4,5	3,7	1	7,5	51,2	41,1	9,9	4,0	2,4
BC	110-150+	730	130	140	4,2	3,6	1	7,5	53,6	38,9	10,7	2,8	2,6
Perfil 3: Alissolo Crômico Argilúvico câmbico abrupto textura arenosa/média													
Ap	0-20	800	80	120	4,9	4,0	25	11,6	14,1	13,5	4,4	2,7	2,0
Bt	20-41	720	80	200	4,5	3,7	2	7,0	25,1	22,2	5,6	2,9	2,2
CR	41-80+	760	100	140	4,3	3,7	1	5,2	44,2	32,7	11,1	2,8	2,6

<sup>(1)</sup> C<sub>Org</sub> = carbono orgânico.

Os solos são extremamente ácidos, com pH em CaCl<sub>2</sub>, variando de 3,7 a 3,9 no horizonte Bt (Quadro 2), o que pode ser relacionado com os altos teores de alumínio trocável, caracterizando solos álicos. Os teores de alumínio trocável aumentam em sentido descendente no perfil e mostram incremento em direção ao terço inferior da encosta (Quadro 3). Os teores de Si e Al extraídos pelo ataque sulfúrico são crescentes em profundidade, o que pode ser justificado pela maior quantidade de argila e minerais primários intemperizáveis. Os teores de ferro são baixos em todos os materiais, refletindo o baixo teor deste elemento no material de origem. Os teores de titânio mostram pequenas variações, indicando uniformidade dos materiais e a filiação do solo ao arenito subjacente (Quadro 2). Os teores de fósforo e potássio no horizonte Ap são altos e médios, enquanto os de magnésio e cálcio são médios e baixos, sendo influenciados pela adição de corretivos e fertilizantes na cana-de-açúcar. Os teores de carbono orgânico são baixos em todos os perfis. A CTC da fração mineral aumenta em profundidade, caracterizando solos com argila de atividade alta (Quadros 2 e 3).

### Mineralogia dos solos

A mineralogia da fração areia muito fina é marcada pelo predomínio de quartzo, com pequena quantidade (< 2%) de minerais intemperizáveis,

como feldspatos e micas. A frequência destes minerais foi maior no perfil P3, o que se justifica por ser um solo raso, menos intemperizado e próximo ao material de origem. Dentre os minerais pesados transparentes, nota-se o predomínio de turmalina e estauroлита.

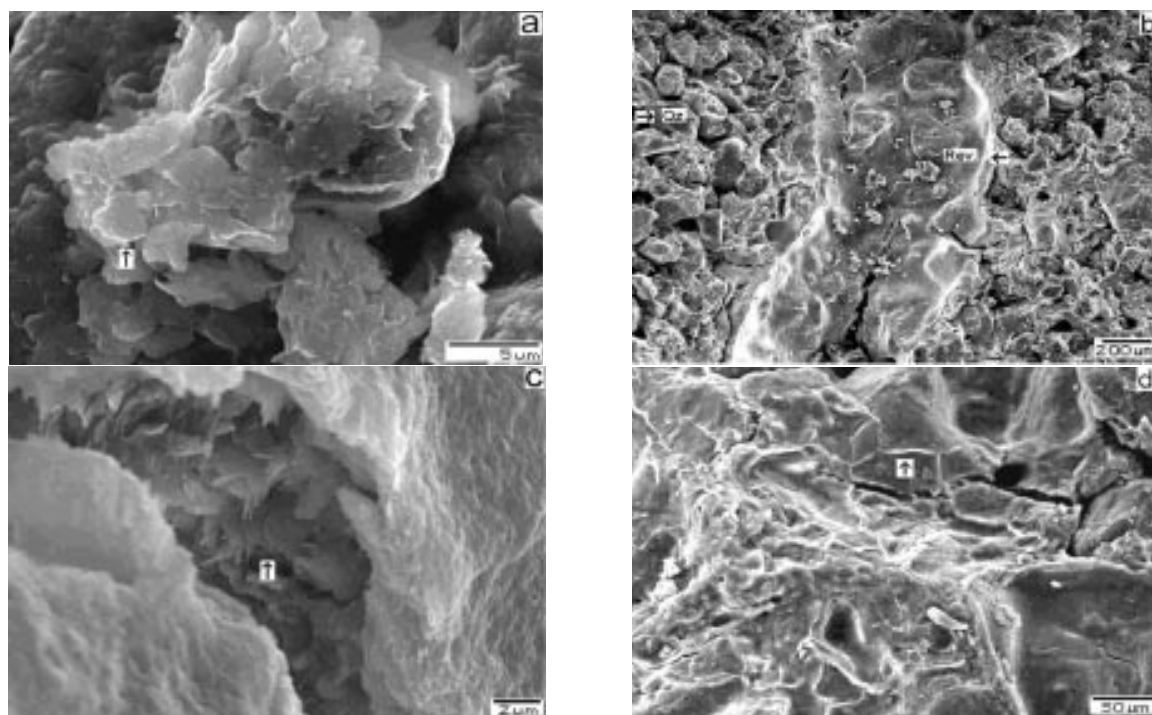
A fração silte apresenta predomínio de quartzo, com ocorrência secundária de feldspatos, que mostram picos pronunciados apenas nas amostras em subsuperfície do perfil P3 (Figura 4a). Na fração argila, observa-se predomínio de caulinita e, de forma menos intensa, a de gibbsita (Figura 4b). Os minerais 2:1 presentes são as ilitas e vermiculita com hidróxi entrecamadas (VHE). As ilitas são provavelmente originárias do material de origem (arenito Pirambóia), segundo Demattê & Holowaychuck (1977). Outra possível origem de minerais 2:1 como VHE é atribuída ao intemperismo químico dos feldspatos presentes na fração silte do solo ou à alteração das ilitas. A ocorrência de VHE nesses solos com drenagem livre pode ser considerada comum e a ilita teria, nestas condições, maior estabilidade em relação à caulinita (Karathanasis et al., 1983) e poderia ser considerada, em parte, responsável pela CTC relativamente alta desses solos. A presença de argilominerais 2:1 em solos da região de Piracicaba tem sido relatada em alguns solos com horizonte B textural que apresentam argila de atividade baixa (Tb), Argissolos, da Formação Pirambóia (Moniz et al., 1995).



**Quadro 3. Composição do complexo sortivo dos solos desenvolvidos sobre arenito**

Horizonte	Profundidade	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB <sup>(1)</sup>	Al <sup>3+</sup>	t <sup>(2)</sup>	H + Al	T <sup>(3)</sup>	Targ <sup>(4)</sup>	V <sup>(5)</sup>	m <sup>(6)</sup>
	cm	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>									%	
Perfil 1: Alissolo Crômico Argilúvico arênico abrupto textura arenosa/média												
Ap	0-23	0,2	3,2	0,7	4,1	0	4,1	1,6	5,7	18,9	72	0
E	23-46	0,1	3,2	0,9	4,2	0	4,2	1,3	5,5	23,2	76	0
E/Bt1	46-75	0,1	3,7	1,6	5,4	0	5,4	2,2	7,6	19,4	71	0
Bt1	75-130	0,1	1,3	0,5	1,9	4,1	6,0	7,4	9,3	30,6	20	68
Bt2	130-250+	0,0	0,8	0,3	1,1	4,4	5,5	8,1	9,2	33,0	12	80
Perfil 2: Alissolo Crômico Argilúvico abrupto textura arenosa/média												
Ap	0-22	0,4	1,9	0,4	2,7	0,4	3,1	3,1	5,8	35,9	46	13
E	22-56	0,3	1,0	0,2	1,5	1,0	2,5	2,8	4,3	35,5	35	40
Bt	56-110	0,5	1,7	0,5	2,7	4,6	7,3	8,2	10,9	24,3	25	63
BC	110-150+	0,1	1,8	0,5	2,4	8,0	10,4	28,1	30,5	193,8	8	77
Perfil 3: Alissolo Crômico Argilúvico câmbico abrupto textura arenosa/média												
Ap	0-20	0,6	1,9	0,6	3,1	1,6	4,7	4,7	7,8	21,5	39	35
Bt	30-41	0,1	1,0	0,3	1,4	4,5	5,9	11,3	12,7	47,8	11	76
CR	41-80+	0,1	0,4	0,2	0,7	10,0	10,7	22,8	23,5	151,1	3	93

<sup>(1)</sup> SB = soma de bases. <sup>(2)</sup> t = CTC efetiva (SB + Al). <sup>(3)</sup> T = CTC a pH 7,0 (SB + H + Al). <sup>(4)</sup> T<sub>Arg</sub> = CTC da argila descontando-se a participação do carbono {T<sub>Arg</sub> = 1.000 (T - 0,45 C<sub>Org</sub>)/Argila}. <sup>(5)</sup> V = saturação por bases em relação a "T". <sup>(6)</sup> m = saturação por alumínio em relação a "t".



**Figura 3. Micrografias do plasma argiloso caulinitico observado ao microscópio eletrônico de varredura: (a) argila ocupando os espaços intergranulares, com formato laminar no contato E/Bt (P1); (b) revestimento argiloso (Rev.) em poro tubular no topo do horizonte Bt (P2), mostrando material arenoso rico em quartzo (Qz) nas adjacências; (c) detalhe das argilas com disposição laminar em uma fissura correspondente ao revestimento encontrado na amostra "b"; (d) argilas no horizonte Bt2 (P1) mostrando aspecto moldado e fissuras, provavelmente decorrente do dessecação e umedecimento alternados.**

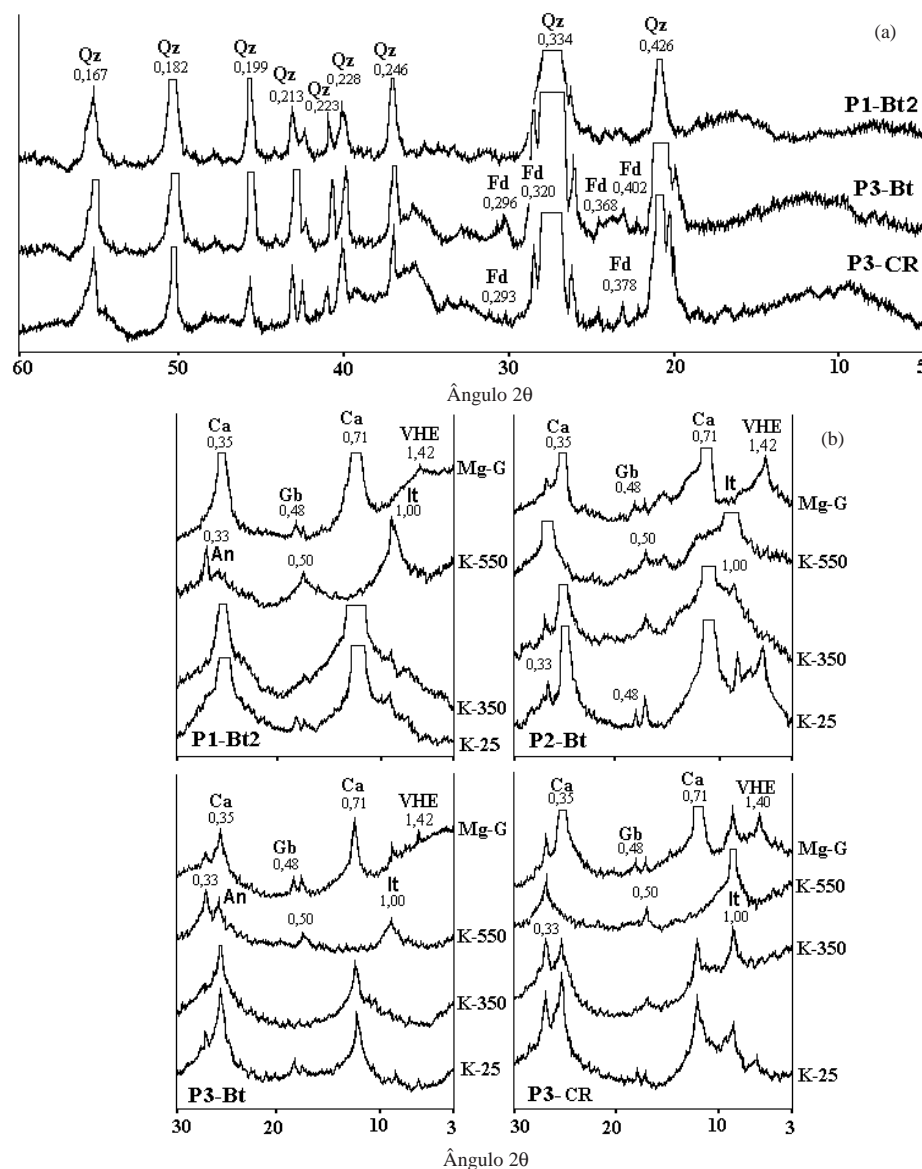


Figura 4. Difrátogramas de raios-X da fração silte (a) e da fração argila (b), sendo, An = anatásio; Ca = caulinita; Fd = feldspatos; Gb = gibbsita; It = ilitas; Qz = quartzo; VHE = vermiculita com hidróxi entrecamadas (Distâncias interplanares em nanômetros).

#### Uniformidade e filiação dos materiais

A distribuição granulométrica das areias evidenciou predomínio de fração fina (Quadro 4), com pequena variação da relação areia fina/areia total (AF/AT) em profundidade, indicando uniformidade da cobertura pedogênica, guardando relação com o material de origem subjacente (Figura 5). A análise estatística referente à distribuição granulométrica evidencia similaridade dos grãos de areia quanto ao diâmetro médio, amplitude, assimetria e curtose (Quadro 4). Esta

uniformidade é também evidenciada pelo aspecto morfológico das areias, observado em lâminas delgadas, as quais apresentam formato predominantemente subarredondado (Figura 2). A distribuição dos teores de Ti anteriormente apresentada (Quadro 2) reforça ainda a homogeneidade dos materiais constituintes desses solos, visto que este elemento está ligado a minerais resistentes ao intemperismo, como rutilo, anatásio e ilmenita.

O comportamento da relação zircão/turmalina, que são considerados minerais resistentes ao

**Quadro 4. Distribuição percentual das frações de areia e análise estatística do tamanho dos grãos, visando avaliar a uniformidade dos materiais**

Horizonte	Profundidade	Fração de areia <sup>(1)</sup>				Análise estatística			
		Grossa	Média	Fina	Muito fina	DM <sup>(2)</sup>	Amplitude <sup>(3)</sup>	Assimetria	Curtose
	cm	%				mm			
Perfil 1: Alissolo Crômico Argilúvico arênico abrupto textura arenosa/média									
Ap	0-23	4	22	57	17	0,19	0,12-0,32	-0,05	+1,18
E	43-46	4	24	56	17	0,19	0,12-0,32	-0,04	+1,19
E/Bt1	46-75	3	25	55	17	0,19	0,12-0,32	0,00	+1,13
Bt1	75-130	3	27	56	14	0,20	0,13-0,32	0,00	+1,14
Bt2	130-250+	4	27	55	14	0,20	0,13-0,34	-0,03	+1,15
Perfil 2: Alissolo Crômico Argilúvico abrupto textura arenosa/média									
Ap	0-22	2	23	58	16	0,19	0,12-0,30	+0,01	+1,15
E	22-56	2	22	61	15	0,19	0,12-0,30	0,00	+1,21
Bt	56-110	3	26	56	15	0,20	0,12-0,32	0,00	+1,16
BC	110-150+	1	26	63	10	0,20	0,13-0,30	+0,04	+1,17
Perfil 3: Alissolo Crômico Argilúvico câmbico abrupto textura arenosa/média									
Ap	0-20	3	25	59	14	0,20	0,13-0,31	+0,02	+1,15
E	20-30	2	24	58	15	0,19	0,12-0,30	+0,01	+1,17
Bt	30-41	4	25	58	13	0,21	0,13-0,33	-0,05	+1,22
CR	41-80+	11	25	51	13	0,23	0,13-0,41	-0,15	+1,13

<sup>(1)</sup> Areia grossa = 2,0-0,5 mm, areia média = 0,5-0,25 mm, Areia fina = 0,25-0,1 mm, areia muito fina = muito fina = 0,1-0,05 mm.

<sup>(2)</sup> DM = diâmetro médio. <sup>(3)</sup> Amplitude (DM  $\pm$  desvio-padrão).

intemperismo e pouco móveis, constituindo-se bons minerais-índice (Demattê, 1978), mostrou-se uniforme em profundidade.

Em conjunto, os critérios de avaliação da uniformidade dos constituintes do solo, tais como: parâmetros estatísticos da distribuição granulométrica, aspecto exoscópico dos grãos de quartzo, composição química de elemento estável (Ti) e presença de minerais-índice apontam para homogeneidade do solo e permitem admitir seu desenvolvimento autóctone e filiação ao arenito subjacente. Neste caso, pode-se desconsiderar a participação de processos de ordem deposicional/erosiva na formação do gradiente textural nesses solos, indicando contribuição efetiva de processos pedogenéticos, como também constatado em outros perfis de solos com horizonte B textural no leste australiano (Chittleborough & Oades, 1980; Chittleborough et al. (1984b) e num Argissolo Vermelho-Amarelo do Rio Grande do Sul (Almeida et al., 1997).

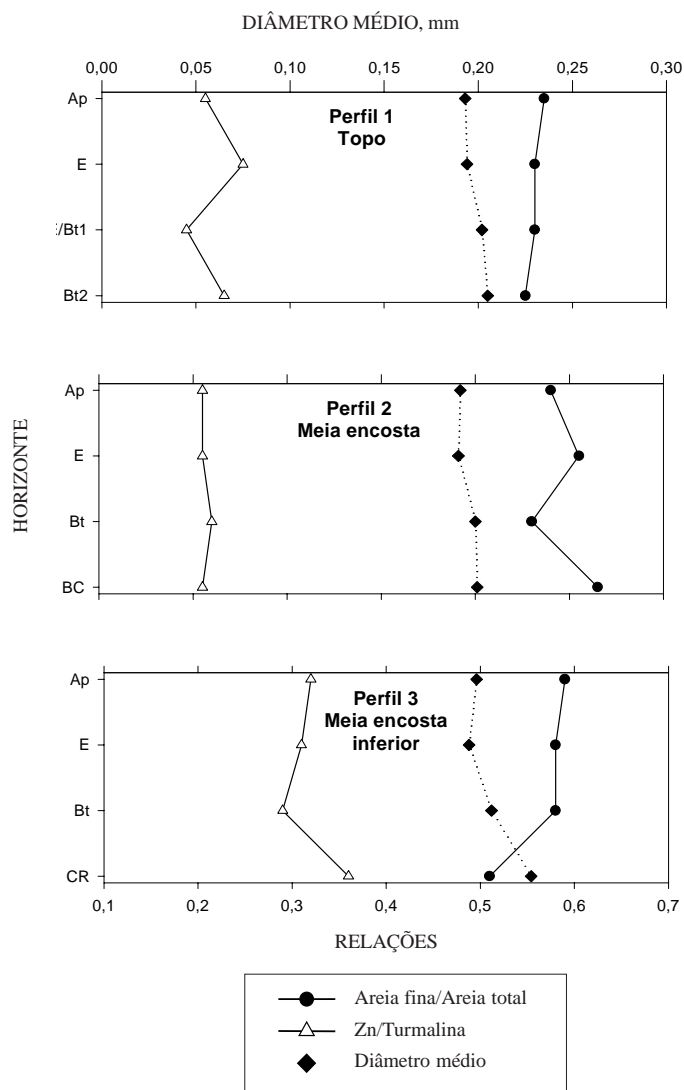
#### **Processos pedogenéticos envolvidos na formação do gradiente textural**

O material de origem destes solos, no caso o arenito da Formação Pirambóia, já evidencia parte da história pedogenética dos três perfis aqui estudados. Tal material apresenta-se bastante

diferenciado, evidenciando porções mais claras e arenosas, com a presença ou não de cutãs. No contato entre os microdomínios alterados e a rocha, observam-se cores acromáticas, que indicam encharcamento temporário. Tal quadro se repete nos horizontes dos perfis estudados, principalmente no horizonte Bt, onde há presença destes bolsões mais arenosos. De espaço em espaço, é comum observar formas lamelares, de espessura variável, desde as milimétricas até as com alguns centímetros de espessura, contínuas ou não. Em tais formas lamelares, é possível encontrar cutãs. Portanto, parte dos processos pedogênicos que moldaram os três perfis já ocorria no material de origem.

A partir daí, o desenvolvimento do gradiente textural nestes perfis e o espessamento do horizonte alvíco, destacado principalmente nas porções mais elevadas da paisagem, apontam para uma ação conjunta da evolução do relevo associada à dinâmica da água, o que é concordante com o relato de Daniels et al. (1967) que estudaram ultissolos da Planície Costeira da Carolina do Norte (EUA). Nestes solos, o espessamento do horizonte eluvial mostrava relação com a superfície geomórfica. Este horizonte era mais desenvolvido nas porções do relevo em que o nível do lençol freático era mais profundo.

Assim, pode-se supor que no topo, onde se localiza o perfil mais profundo (P1), a infiltração seja



**Figura 5. Atributos granulométricos e mineralógicos AT= relacionados com a uniformidade dos materiais do solo. AF/AT = relação areia fina/areia total; Zr/Tur. = relação zircão/turmalina; Diâm. médio = diâmetro médio das areias (mm).**

potencialmente maior, havendo condições para o maior arraste das partículas de argila dispersa. Por outro lado, no perfil P3, localizado no terço inferior da encosta, a menor espessura está relacionada com a maior declividade, que ocasiona menor infiltração da água. Observa-se também que, na base dos perfis localizados no terço médio da encosta (P2) e no terço inferior da encosta (P3), há formação de porções mais claras e arenosas, semelhantes às do horizonte E, circundando os volumes alterados da rocha. Esse material mais claro revela locais com circulação diferenciada das soluções, provocando alterações no estado de oxidação dos óxidos de ferro e intensificando a alteração da rocha.

A formação das lamelas nos solos estudados deve-se principalmente a processos pedogenéticos, uma vez que não há indícios de descontinuidade litológica ou estruturas mais argilosas associadas ao arenito subjacente. O desenvolvimento dessas estruturas é descrito por Schaetzl (1992) em solos arenosos no norte do Michigan (EUA) e por Dijkerman et al. (1967) e Bound (1986), que centraram seus trabalhos na formação de lamelas em colunas de solo em laboratório.

Vários mecanismos podem ser responsáveis pelo acúmulo de argilas em suspensão nessas estruturas, dentre os quais se destacam a deposição em frentes de ressecamento do solo e o entupimento de poros

finos associado ao fluxo hídrico descendente no perfil. Esses mecanismos tornam-se mais efetivos quando há floculação das partículas em determinadas porções do solo, o que pode ser influenciado, dentre outras causas, pela oxidação de compostos de ferro. Muitos desses mecanismos de natureza pedogenética têm sido identificados na formação de lamelas em alguns solos formados sobre sedimentos no estado de São Paulo (Castro, 1989; Vidal Torrado, 1994).

As observações macro e micromorfológicas efetuadas no contato dos horizontes E/Bt1 destacam volumes milimétricos irregulares mais argilosos (lamelas) no horizonte eluvial, que podem ser interpretados como relíquias de um antigo conjunto argílico em função de suas semelhanças morfológicas e analíticas. No topo do horizonte Bt, haveria condições de degradação das argilas, formando o material arenoso. Em algumas porções preservadas desta ação, seria possível o desenvolvimento de lamelas graças à contribuição de mecanismos, como entupimento de poros finos, associado ao fluxo hídrico descendente no perfil, conforme evidenciado na caracterização ao microscópio eletrônico de varredura (Figura 3a).

Um dos processos pedogenéticos envolvidos no desenvolvimento do gradiente textural na sequência estudada é o de lessivagem, que se evidencia pela presença de cerosidade no horizonte Bt. A cerosidade aí identificada distribui-se na superfície de agregados e em poros tubulares funcionais, evidenciando a ação atual deste processo. Estas estruturas são correspondentes a cutãs de iluviação identificados nas lâminas delgadas. A lessivagem é um dos processos pedogenéticos mais comuns envolvidos na formação do gradiente textural (Eswaran & Sys, 1979), sendo verificado comumente em solos com caráter abrupto (Chittleborough et al., 1984a). A lessivagem é influenciada pela quantidade e tipos de colóides do solo, pela natureza e concentração de eletrólitos, pela atividade das argilas e pelo fluxo de água no solo (Nettleton et al., 1987).

Para ter início o processo, há necessidade de mecanismos de dispersão das argilas nos horizontes de eluviação, normalmente relacionados com a presença de compostos orgânicos ou com os tipos de cátions adsorvidos às argilas (Dixit et al., 1975). Dos argilominerais, as esmectitas são normalmente preferencialmente arrastadas (Smith & Wilding, 1972).

No caso ora estudado, onde predomina a caulinita na fração argila, o arraste seria favorecido pelas condições de acúmulo de água no topo do horizonte Bt durante os períodos chuvosos (hidromorfia temporária), quando a precipitação excederia a condutividade hidráulica desse material, provocando redução dos teores de oxigênio. Neste caso, haveria redução e solubilização dos óxidos de ferro, provocando a desestabilização da agregação do solo

por rompimento das ligações argila-ferro, predispondo as argilas à lessivagem (Lepsch et al., 1977). O processo de hidromorfia temporário aparece evidenciado no horizonte Bt1 pela presença de domínios milimétricos descoloridos e por ferriargilãs, que apresentam internamente orientação manchada e estrias pretas de segregação de ferro (Figura 2b).

A relação entre a presença de cutãs identificáveis nas seções delgadas e o processo de lessivagem tem sido intensamente discutida e constitui-se ainda um assunto controverso em relação a solos com horizonte B textural. Vários estudos clássicos têm comprovado que muitos solos que demonstram cerosidade no exame macromorfológico não apresentam cutãs, quando do estudo ao microscópio ótico (Nettleton et al., 1969; McKeague et al., 1978, 1981; Chittleborough & Oades, 1980). Tal comportamento pode, em parte, ser explicado pela ação da pedoplasmação, por ação biológica ou por alterações volumétricas na massa do solo por repetidos ciclos de contração e expansão provocados pelo ressecamento e umedecimento do solo (Bennema et al., 1970).

Tais alterações no plasma provocadas pela contração e expansão ocorrem mesmo em solos de natureza caulinitica (Holzhey et al., 1974), os quais são caracterizados por baixos índices de variação volumétrica, normalmente inferiores a 10% (Mbagwu & Abenh, 1998).

Nos solos estudados, os processos de contração e expansão são evidenciados pela presença de plasma com birrefringência reticulada e granoestriada (Quadro 1). A relação entre a presença de cerosidade com revestimentos de argila e os cutãs de iluviação pode ser atribuída à espessura relativamente grande dos revestimentos, de 10 a 30  $\mu\text{m}$ , conforme as observações efetuadas em microscopia eletrônica de varredura (Figuras 3b e 3d).

Sullivan & Koppi (1994), estudando detalhadamente a ocorrência de cutãs em solos argilosos da Austrália, verificaram que muitos dos cutãs são inferiores a 10  $\mu\text{m}$  de espessura e só podem ser identificados adequadamente ao microscópio eletrônico de varredura. Eles também salientaram algumas feições típicas dessas estruturas que confirmam se tratarem de iluviais, tais como: ausência de partículas de silte dentro dos revestimentos, aparência laminada das argilas dentro da estrutura, confirmando a formação por deposição de partículas em suspensão, e ausência de estriamentos que seriam típicos de estruturas formadas por estresse. Essas feições de iluviação foram constatadas no material proveniente do horizonte Bt do perfil P2 (Figura 3c), confirmando a relação entre a presença de cerosidade, os cutãs e o processo de lessivagem nesses solos.

Salienta-se, também, que nem todos os argilãs podem ser relacionados com o processo de argiluviação. Em muitos casos, estas estruturas formam-se no próprio local, por microdivisão de



micas ou por migração em distâncias curtas (Smith & Wilding, 1972). A formação "*in situ*" das argilas é uma das possíveis causas do desenvolvimento do gradiente textural em solos. É possível que essa ação tenha contribuição nos solos estudados, principalmente na porção inferior da sequência, nos perfis P2 e P3. Nestes, observam-se alguns índices de intemperismo, como o aumento descendente da CTC, do Ki (ligeira alteração) e da relação silte/argila entre os horizontes Bt e o material de alteração subjacente (Quadro 2), mostrando uma possível neoformação de argilas por intemperismo dos minerais primários, como feldspatos e micas.

Outro processo identificado nesses solos é a degradação do topo do Bt em consequência de reações de oxirredução conhecidas como ferrólise (Brinkman, 1970). Este processo manifesta-se em condições extremamente ácidas (pH entre 3 e 4), no contato dos horizontes E/Bt, onde são evidentes cores de gleização, indicando encharcamento temporário, condição observada mais nitidamente no perfil P1. Nestas condições, o ferro é solubilizado e removido, sendo substituído por  $H^+$  e produzindo com isso a protólise das argilas, tornando-as instáveis e sujeitas à destruição.

A degradação das argilas tem sido apontada como responsável pelo desenvolvimento do gradiente textural em muitos solos podzolizados (Bullock et al., 1974; Berg et al., 1987; Chartres, 1987; Almeida et al., 1997).

As evidências morfológicas do processo de degradação das argilas são as seguintes: o desmantelamento das microestruturas em blocos subangulares, com tramas gefúricas; nascimento das microestruturas em grãos simples, com tramas chitônicas, no contato E/Bt, as quais também foram observadas nas descrições macromorfológicas; e a presença de uma zona mais densa herdada do material argílico, isolada no material arenoso (Figura 2a). Essas estruturas relacionadas com a perda de argila em condições de saturação temporária podem ser evidenciadas em estudos recentes envolvendo a gênese de solos com gradiente textural (Kemp et al., 1998; Calero Merino, 1999). Outro indicativo da degradação das argilas no horizonte Bt é o aumento no teor de alumínio trocável neste horizonte observado em direção ao terço inferior da encosta (Quadro 3), refletindo condições mais intensas de intemperismo, supostamente ligado à participação de fluxo hídrico lateral neste horizonte (Moniz et al., 1982).

Em relação ao processo de ferrólise, convém lembrar que na fase oxidante que se segue à fase redutora, ocorre a oxidação dos íons  $Fe^{2+}$  para íons  $Fe^{3+}$ , os quais hidrolisam e precipitam como óxidos de ferro, gerando prótons  $H^+$ , que atuam na dissolução dos argilominerais (Brinkman, 1979). Neste caso, seria esperada menor concentração de Fe no horizonte eluvial (E) em relação ao horizonte

iluvial (Bt) subjacente, o que não se constata nos perfis P1 e P2 (Quadro 2), possivelmente pela permanência deste elemento em nódulos ferruginosos na fração areia.

## CONCLUSÕES

1. Os materiais analisados evidenciaram uniformidade quanto aos índices e parâmetros estatísticos da distribuição granulométrica, arredondamento e relação zircão/turmalina das areias, apontando para formação autóctone do solo.

2. Os processos pedogenéticos em curso responsáveis pela formação do gradiente textural nestes solos foram, principalmente, a degradação das argilas em condições de oxirredução, ocorrida no topo do horizonte Bt, e a lessivagem, podendo-se admitir também a formação "*in situ*" de argilas no horizonte Bt, com papel secundário.

3. Os perfis P1 e P3 não se enquadraram no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, razão por que se recomendou a criação das classes Alissolos Crômicos Argilúvicos arênicos e Alissolos Crômicos Argilúvicos câmbicos no 4º nível categórico deste sistema.

## AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Ney Pinheiro Sampaio, do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (NUPEGEL/USP), pela obtenção das micrografias ao MEV e análises pontuais com microsonda.

## LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, J.A.; KLAMT, E. & KÄMPF, N. Gênese do contraste textural e da degradação do horizonte B de um Podzólico Vermelho-Amarelo da planície costeira do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 21:221-233, 1997.
- BENNEMA, J.; JONGERIUS, A. & LEMOS, R.B. Micromorphology of some oxic and argillic horizons in South Brazil in relation to weathering sequences. Geoderma, 4:333-355, 1970.
- BERG, M. van den; LEPSCH, I.F. & SAKAI, E. Solos de planícies aluviais do Vale do Ribeira do Iguape. II. Relações entre características químicas e físicas. R. Bras. Ci. Solo, 11:315-321, 1987.
- BOUND, W.J. Illuvial band formation in a laboratory column of sand. Soil Sci. Soc. Am. J., 50:265-267, 1986.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço Nacional de Pesquisa Agronômica. Comissão de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, 1960. 634p. (Boletim, 12)

- BRINKMAN, R. Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, 3:199-206, 1970.
- BRINKMAN, R. Ferrollysis, a soil forming process in hydromorphic conditions. Agricultural University of Wageningen, 1979. 106p. (Tese de Doutorado)
- BROWN, G. & BRINDLEY, G.W. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. London, Mineralogical Society, 1980. p.305-360.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. & TURSINA, T. Handbook for soil thin section description. London, Waine Research Publications, 1985. 152p.
- BULLOCK, P.; MILFORD, M.H. & CLINE, M.G. Degradation of argillic horizons in Udalf soils of New York State. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:621-628, 1974.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D. & McCracken, R.J. Soil genesis and classification. Ames, Iowa State University Press, 1997. 527p.
- CALERO MERINO, M. Mineralogia e gênese de solos originados de rochas da Formação Irati: região de Piracicaba, SP. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1999. 207p. (Tese de Doutorado)
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C. JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo do estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- CASTRO, S.S. Impregnação de amostras de solo para confecção de lâmina delgada. *B. Inf. SBCS*, 10:44, 1985.
- CASTRO, S.S. Sistemas de transformação pedológica em Marília (SP): B latossólicos e B texturais. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1989. 274p. (Tese de Doutorado)
- CHARTRES, C.J. The composition and formation of grainy void cutans in some soils with textural contrast in Southeastern Australia. *Geoderma*, 39:209-233, 1987.
- CHITTLEBOROUGH, D.J. & OADES, J.M. The development of a red-brown earth. III. The degree of weathering and translocation of clay. *Aust. J. Soil. Res.*, 18:383-393, 1980.
- CHITTLEBOROUGH, D.J.; WALKER, P.H. & OADES, J.M. Textural differentiation in chronosequences from eastern Australia. I. Descriptions, chemical properties and micromorphology of soils. *Geoderma*, 32:181-202, 1984a.
- CHITTLEBOROUGH, D.J.; WALKER, P.H. & OADES, J.M. Textural differentiation in chronosequences from eastern Australia. II. Evidences from particle-size distributions. *Geoderma*, 32:203-226, 1984b.
- DANIELS, R.B.; GAMBLE, E.E. & NELSON, L.A. Relation between A2 horizon characteristics and drainage in some fine loamy Ultisols. *Soil Sci.*, 104:364-369, 1967.
- DECHEN, S.C.F.; DEMATTÊ, J.L.I. & MARCONI, A. Caracterização e micromorfologia de Podzólicos e Cambissolos desenvolvidos de folhelhos da Formação Corumbataí. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:99-107, 1993.
- DEMATTÊ, J.L.I. Zircônio e titânio da fração areia de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:74-77, 1978.
- DEMATTÊ, J.L.I. & HOLOWAYCHUCK, N. Solos da região de São Pedro, estado de São Paulo. II. Mineralogia. *R. Bras. Ci. Solo*, 1:99-103, 1977.
- DIJKERMAN, J.C.; CLINE, M.G. & OLSON, G.W. Properties and genesis of textural subsoil lamellae. *Soil Sci.*, 104:7-16, 1967.
- DIXIT, S.P.; GOMBEER, R. & D'HOORE, J. The electrophoretic mobility of natural clays and their potential mobility within the pedon. *Geoderma*, 13:325-330, 1975.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPq. Documentos, 1)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy. 8.ed. Washington, 1998. 326p.
- ESWARAN, H. & SYS, C. Argillic horizon in LAC soils: formation and significance to classification. *Pedologie*, 29:175-190, 1979.
- FIORIO, P.R. Cronologia do uso da terra e seu impacto no ambiente da microbacia hidrográfica do córrego do Ceveiro da região de Piracicaba, SP. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 107p. (Tese de Mestrado)
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. Brazos river bar: a study on the significance of grain-size parameters. *J. Sedim. Petr.*, 27:3-26, 1957.
- HOLZHEY, C.S.; YECK, R.D. & NETTLETON, W.D. Microfabric of some argillic horizons in Udic, Xeric and Torric soil environments of the United States. In: RUTHERFORD, G.K., ed. Soil microscopy. Kingston, The Limestone Press, 1974. p.747-759.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Mapa geológico do estado de São Paulo. São Paulo, 1981. v.1.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: advanced course. Madison, University of Wisconsin, 1969. 895p.
- JONG van LIER, Q. & VIDAL-TORRADO, P. Phi: programa de microcomputador para análise estatística da granulometria de sedimentos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:277-281, 1992.
- KARATHANASIS, A.D.; ADAMS, F. & HAJEK, B.F. Stability relationships in kaolinite, gibbsite and Al-hydroxyinterlayered vermiculite soil systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1247-1251, 1983.
- KEMP, R.A.; McDANIEL, P.A. & BUSACCA, A.J. Genesis and relationship of macromorphology and micromorphology to contemporary hydrological conditions of a welded Argixeroll from the Palouse in Idaho. *Geoderma*, 83:309-329, 1998.
- LEMOES, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.

- LEPSCH, I.F.; BUOL, S.W. & DANIELS, R.B. Soil landscape relationships in the occidental plateau of São Paulo, Brazil. II. Soil morphology, genesis and classification. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:109-115, 1977.
- MBAGWU, J.S.C. & ABEH, O.G. Prediction of engineering properties of tropical soils using intrinsic pedological parameters. *Soil Sci.*, 163:93-102, 1998.
- McKEAGUE, J.A.; GUERTIN, R.K.; PAGE, F. & VALENTINE, K.W.G. Micromorphological evidence of illuvial clay in horizons designated Bt in the field. *Can. J. Soil Sci.*, 58:179-186, 1978.
- McKEAGUE, J.A.; WANG, C.; ROSS, G.J.; ACTON, C.J.; SMITH, R.E.; ANDERSON, D.W.; PETTAPIECE, W.W. & LORD, T.M. Evaluation of criteria for argillic horizons (Bt) of soils in Canada. *Geoderma*, 25:63-74, 1981.
- MONIZ, A.C.; BUOL, S.W. & WEED, S.B. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil. II. Lateral dynamics of chemical weathering. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1234-1239, 1982.
- MONIZ, A.C.; OLIVEIRA, J.B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila de rochas sedimentares e de solos da folha de Piracicaba (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 19:375-385, 1995.
- MOORE, D.M. & REYNOLDS Jr., R.C. X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals. Oxford, Oxford University Press, 1989. 332p.
- NETTLETON, W.D.; ESWARAN, H.; HOLSZEY, C.S. & NELSON, R.E. Micromorphological evidence of clay translocation in poorly dispersible soil. *Geoderma*, 40:37-48, 1987.
- NETTLETON, W.D.; FLACH, K.W. & BRASHER, B.R. Argillic horizons without clay skins. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33:121-125, 1969.
- PRADO, H. Desenvolvimento de horizontes superficiais de solos podzólicos relacionados com as formações Corumbataí e Pirambóia. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1986. 149p. (Tese de Mestrado)
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. (Boletim técnico, 81)
- SCHAETZL, R.J. Texture, mineralogy and lamellae development in sandy soils in Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1538-1545, 1992.
- SILVA, E.F. Mapas de solos produzidos em escalas e épocas distintas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2000. 177p. (Tese de Doutorado)
- SMITH, H. & WILDING, L.P. Genesis of argillic horizons in Ochraqualls derived from fine textured till deposits of Northwestern Ohio and Southeastern Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:808-815, 1972.
- SULLIVAN, L.A. & KOPPI, A.J. Submicromorphology of undulating lustrous-faced peds from some clayey soils. *Soil Sci.*, 158:218-223, 1994.
- VIDAL TORRADO, P. Pedogênese e morfogênese no distrito de Tupi (Piracicaba-SP). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1994. 212p. (Tese de Doutorado)
- WEST, L.T.; BEINROTH, F.H.; SUMMER, M.E. & KANG, B.T. Ultisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.*, 63:179-236, 1998.

