



ARTIGO ORIGINAL

Milton Cesar Costa Campos^{1*}
Rafael Montanari²
José Marques Junior³
Gener Tadeu Pereira³
Zigomar Menezes Souza⁴

¹Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente,
Universidade Federal do Amazonas – UFAM,
Rua 29 de Agosto, 786, 69800-000,
Humaita, AM, Brasil

²Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul –
UEMS, Unidade de Aquidauana,
Rod. Aquidauana/UEMS, km 12, Rural,
79200-000, Aquidauana, MS, Brasil

³Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Filho – UNESP, Via de Acesso Prof. Paulo Donato
Castelane, s/n, 14884-900, Jaboticabal, SP, Brasil

⁴Departamento de Água e Solo, Faculdade de
Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de
Campinas – UNICAMP, Cidade Universitária
Zeferino Vaz, s/n, Barão Geraldo, 13083-875,
Campinas, SP, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: mcesarsolos@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Forma da paisagem
Gênese do solo
Mineralogia

KEYWORDS

Landscape form
Genesis of soil
Mineralogy

Caracterização de Argissolos em diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal, SP

Characterization of Ultisol in different relief forms in the region of Jaboticabal, SP

RESUMO: O solo é produto da ação conjunta de material de origem, clima, relevo, tempo e organismos, associados aos processos pedogenéticos gerais de adição, remoção, translocação e transformação, que determinam o comportamento do solo. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a classe de Argissolos em diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal-SP. Foram abertas três trincheiras nos segmentos de topo, encosta e sopé. Em seguida, foram realizadas a descrição morfológica dos horizontes e a coleta de solo para caracterização física, química e mineralógica. Os atributos físicos e químicos obedeceram ao padrão de exposição dos segmentos de vertente existentes. O maior grau de cristalinidade dos óxidos de ferro ocorreu no topo da paisagem, quando comparado aos ambientes de encosta e sopé. A mineralogia gibbsítica predominou nos segmentos de topo e encosta da paisagem, enquanto que, no sopé, dominou a mineralogia caulinítica.

ABSTRACT: The soil is product of the action of parent material, climate, topography, time and organisms associated to the general pedogenic processes of addition, removal, translocation and transformation, which determine its behavior. Therefore, the aim of this study was to characterize Ultisol in different relief forms in the region of Jaboticabal, State of Sao Paulo. Three trenches were opened in top, back-slope and foothill segments. Morphological description of soil horizons and soil collection for physical, chemical and mineralogical characterization were performed. The physical and chemical properties followed the pattern of exposure of the existing slope segments. The highest degree of crystallinity of iron oxides occurred at the top of the landscape when compared to back-slope and foothill segments. Gibbsite mineralogy was predominant at the top and back-slope segments of the landscape, while kaolinitic mineralogy was predominant at the foothill segment.

1 Introdução

O processo de gênese do solo envolve os fatores de formação (material de origem, clima, relevo, tempo e organismos) e os processos pedogenéticos gerais (adição, remoção, translocação e transformação) que, agindo simultaneamente, determinam o comportamento do solo, por meio de processos pedogenéticos específicos (BOCKHEIM et al., 2005). Por outro lado, no processo de evolução dos solos, um fator ou um processo pode ser mais decisivo do que outros. Cunha et al. (2005), por exemplo, destacam o material de origem como o principal responsável por mudanças nas características do solo.

O relevo é um importante condicionador dos atributos do solo (SAMOUËLIAN; CORNU, 2008). Este fato deve-se às formas do relevo, que influenciam o movimento anisotrópico da água e, conseqüentemente, a promoção de reações químicas, o transporte de sólidos ou de materiais em solução, e a produção de efeitos que se traduzem em diferentes tipos de solos (GHIDIN et al., 2006).

Portanto, a compreensão das diferentes feições do relevo e a identificação do material de origem são ferramentas importantes para o entendimento da variação dos atributos do solo (CAMPOS et al., 2007a). O entendimento das relações entre os solos e as formas do relevo permite compreender a estrutura da paisagem, favorecendo assim a predição da distribuição dos solos, da vegetação e dos processos erosivos, constituindo, dessa forma, uma importante ferramenta para levantamento pedológico e manejo do solo (KRASILNIKOV et al., 2005).

Nas paisagens brasileiras, há grande representatividade da ordem dos Argissolos, que se caracterizam principalmente pelo incremento de argila no horizonte B em relação à porção superior do perfil (horizonte A ou E). Na região de Jaboticabal-SP, os solos com horizonte B textural são

abundantes e muitos deles apresentam gradiente textural abrupto e grande desenvolvimento dos horizontes superficiais (A e E). Estes solos vêm sendo intensamente utilizados para fins agrícolas, o que requer manejo apropriado, considerando-se a alta susceptibilidade à erosão e suas particularidades químicas e físico-hídricas (MAFRA et al., 2001).

O objetivo foi estudar o comportamento de Argissolos em diferentes pedoformas na região de Jaboticabal-SP.

2 Material e Métodos

As áreas de estudo localizam-se no município de Jaboticabal, Nordeste do Estado de São Paulo, as quais estão inseridas no Planalto Ocidental Paulista (21° 17' a 21° 18' S e 48° 08' a 48° 10' W). O relevo é predominantemente suave ondulado a ondulado, com altitude média de 600 m. Nessa área, predominam os Argissolos, distribuídos ao longo das vertentes, com perfis retilíneos e convexos, cujo material de origem consiste principalmente de arenitos da Formação Adamantina (IPT, 1981).

O clima é classificado, segundo Köppen, como subtropical com inverno seco (Cwa), com precipitação média anual de aproximadamente 1.600 mm, com distribuição concentrada no período de outubro a março e relativa seca no período de abril a setembro. A vegetação original era caracterizada por floresta tropical subcaducifólia, estando atualmente sob cultivo de cana-de-açúcar (IPT, 1981).

Para a realização do estudo, procedeu-se ao mapeamento semidetalhado de uma área de 172 ha, utilizando-se equipamento de sistema de posicionamento global de navegação (GPS). Em seguida, com as coordenadas geográficas (altitude, latitude e longitude), elaborou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, cuja fisiografia é representativa da região (Figura 1).

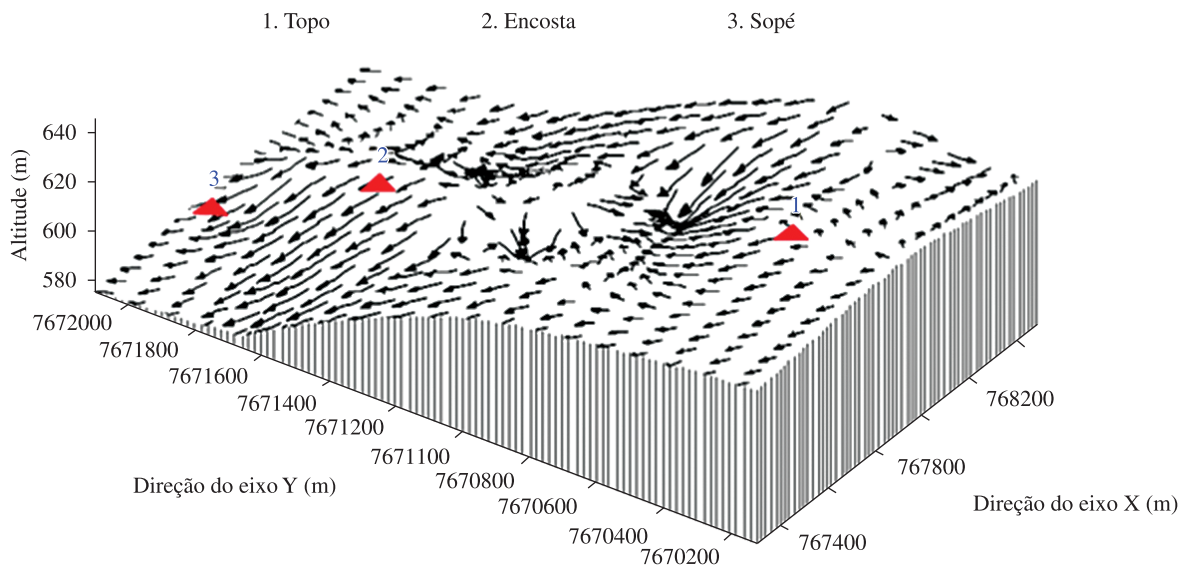


Figura 1. Modelo digital de elevação das áreas estudadas, localização das trincheiras (▼) e direcionamento do fluxo de água (➔).

Foram abertas três trincheiras seguindo o transecto ilustrado na Figura 1, com presença de Argissolos nos segmentos de vertente topo, encosta e sopé, conforme o modelo proposto por Dalrymple et al. (1968). A identificação dos horizontes, a descrição morfológica e a coleta de amostras dos horizontes dos solos foram realizadas conforme Santos et al. (2005). Os solos foram classificados segundo critérios estabelecidos pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006).

A caracterização granulométrica, o pH (água e KCl) e os teores de matéria orgânica foram determinados segundo metodologia descrita em Embrapa (1997). O cálcio, o magnésio e o potássio trocáveis, e o fósforo (P) disponível foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas as somas de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V).

Os óxidos do ataque sulfúrico (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) foram determinados segundo o método proposto pela Embrapa (1997). Os óxidos de ferro livres foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato (MEHRA; JACKSON, 1960); o ferro mal cristalizado foi extraído com oxalato ácido de amônio, segundo Camargo et al. (1986).

A concentração dos óxidos de ferro foi realizada em amostras pulverizadas após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L⁻¹, segundo método de Norrish e Taylor (1961), modificado por Kämpf e Schwertmann (1982). Para a manutenção de concentração mínima de ácido silícico na solução de NaOH 5 mol L⁻¹, foram adicionados 10% em peso de sílica gel moída (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1982). Em seguida, as amostras foram lavadas com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ em agitação por 4 horas. Para a correção dos desvios no posicionamento (d) dos reflexos, foram acrescentados às amostras 10% em peso de NaCl moído e peneirado.

A difração dos raios-X foi realizada em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto, filtro de ferro, radiação K (20 mA, 30 kV) e a velocidade de varredura igual a 1° 2 θ min⁻¹ empregados na difração dos raios-X. Todas as amostras foram preparadas pelo método do pó e peneiradas em malha 0,10 mm. Utilizou-se NaCl como padrão interno na correção das distorções instrumentais (posição e largura à meia altura dos picos).

A razão Gt/(Gt + Hm) foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da Hm (012) e da Gt (110) nos reflexos dos difratogramas e, nesse caso, foi multiplicada a área da Gt (110) pelo valor 0,35, em razão da intensidade de 35% da Hm (012) (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1998). Para quantificar a Hm e a Gt na fração argila, promoveu-se a alocação do Fe_2O_3 obtido com DCB nestes minerais, considerando a fórmula química, relação Gt/(Gt + Hm), e o nível de substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura. A substituição isomórfica (SI) de Fe por Al na estrutura da Hm e da Gt foi estimada pela posição dos picos destes minerais. A posição dos picos de NaCl, em cada amostra, foi utilizada para corrigir os valores das posições dos picos da Hm e da Gt. A SI na Gt foi calculada, segundo Schulze (1984) e, na Hm, segundo Schwertmann et al. (1979).

O diâmetro médio dos cristais (DMC) foi calculado com base na largura à meia altura (LMA) e na posição dos reflexos

dos minerais Hm (110) e Gt (110). A LMA foi corrigida com o uso de amostras de itabirito, hematita e quartzo moídas e peneiradas (0,1 mm) (SCHULZE, 1984), utilizando-se a equação de Scherrer (KLUG; ALEXANDER, 1954).

O sistema caulinita-gibbsita foi obtido pelo método de análise da fração argila desferificada, por difração de raios-X, pelo método do pó (CAMARGO et al., 1986). O difratômetro utilizado foi o HZG-4/B, empregando-se cátodo de Cu com filtro de Ni e radiação K (20 mA, 30 Kv), com velocidade de varredura empregada de 1° 2 θ min⁻¹. A relação Ct/(Ct + Gb) foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002).

O DMC da Gb e da Ct foi calculado a partir da LMA das reflexões 002 e 001, respectivamente, em amostra desferificada (tratada com DCB), utilizando-se NaCl como padrão interno para obtenção do valor de β . De maneira análoga aos óxidos de Fe, o DMC foi obtido pela equação de Scherrer (KLUG; ALEXANDER, 1954).

3 Resultados e Discussão

Foram observadas variações de cor e textura entre os horizontes dos solos estudados. Os perfis mostraram sequência de horizontes que variaram um pouco: no segmento de vertente do topo, a sequência foi A, AB e Bt; na encosta, A e Bt, e no sopé, A, BA e Bt (Tabela 1).

Exceto os horizontes B₁₃ e B₁₁ dos segmentos de topo e encosta, respectivamente, que apresentaram cores com matiz de 2,5YR, todos os demais horizontes apresentaram cores vermelho-amareladas, com matizes variando entre 5YR e 7,5YR, com predominância do 5YR para os horizontes superficiais e 7,5YR para os subsuperficiais (Tabela 1). Este padrão é indicativo de presença predominante de mineralogia oxidica, sendo influenciada pelo regime hídrico, que é condicionado pelas formas do relevo (BRITO et al., 2006).

A classe textural no horizonte superficial de todos os perfis é areia-franca e, no horizonte B, textural franco-argilo-arenosa, passando por franco-arenosa nos horizontes AB dos ambientes de topo e sopé (Tabela 1). O domínio da fração areia nos perfis é explicado pelo material de origem, arenitos da Formação Adamantina. E, em profundidade, destaca-se o aumento da fração argila em todos os segmentos de vertente (Tabela 2), fato que se deve às diferentes faces do relevo, pois o segmento de topo favorece a eluviação e a posterior iluviação de argila de um horizonte para outro, enquanto no segmento de encosta ocorre perda de argila em função dos processos erosionais nos horizontes superficiais, condicionados pelas formas do relevo.

Vale ressaltar que os solos em condições mais estáveis da paisagem apresentam maior espessura de horizontes; no caso, os segmentos de topo e sopé com maior profundidade dos perfis (Tabela 1). Este fato, segundo Cunha et al. (2005), deve-se ao maior acúmulo de sedimentos e às condições de melhor drenagem.

Quanto à estrutura, observa-se que todos os horizontes superficiais dos solos estudados apresentaram estrutura granular variando de pequena a grande, enquanto que, para os demais horizontes, verificou-se presença marcante da estrutura em blocos angulares e subangulares de pequena a grande, com grau de desenvolvimento moderado (Tabela 1),

Tabela 1. Atributos morfológicos de Argissolos em diferentes segmentos de vertentes na região de Jaboticabal-SP.

Horizontes	Profundidade (cm)	Cor úmida	Textura	Estrutura
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico				
A	0-28	7,5YR 3/2	Areia franca	mod., peq. a med. gran.
AB	28-53	7,5YR 3/4	Franco-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
BA	53-75	7,5YR 4/4	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₁	75-105	5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., peq. a med. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₂	105-153	5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₃	153*	2,5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., peq. a med. bl. ang. e sub. ang.
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico				
A	0-36	7,5YR 3/4	Areia franca	mod., med. a gr. gran.
BA	36-65	5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., peq. a med. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₁	65-110	2,5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₂	110*	5YR 4/4	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico				
A	0-26	5YR 3/2	Areia franca	mod., med. a gr. gran.
AB	26-47	7,5YR 3/2	Franco-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
BA	47-68	7,5YR 4/4	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₁	68-92	5YR 5/6	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₂	92-147	5YR 4/6	Franco-argilo-arenosa	mod., med. a gr. bl. ang. e sub. ang.
Bt ₃	147*	5YR 5/6	Franco-argilo-arenosa	

mod.: moderada; fo.: forte; gran.: granular; bl. ang.: blocos angulares; bl. sub. ang.: blocos subangulares; peq.: pequena; méd.: média; gr.: grande.

Tabela 2. Composição granulométrica de Argissolos em diferentes segmentos de vertentes na região de Jaboticabal-SP.

Horizonte	Profundidade cm	Granulometria					Silte/ Argila
		Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico							
A	0-28	150	40	545	265	810	0,26
AB	28-53	180	52	540	228	768	0,28
BA	53-75	250	83	485	212	697	0,33
Bt ₁	75-105	310	59	440	191	631	0,19
Bt ₂	105-153	300	57	430	213	643	0,16
Bt ₃	153+	305	51	433	211	644	0,16
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico							
A	0-36	160	27	537	276	813	0,16
BA	36-65	280	44	455	221	676	0,15
Bt ₁	65-110	320	61	396	223	619	0,19
Bt ₃	110+	330	63	381	226	607	0,19
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico							
A	0-26	130	67	503	300	803	0,51
AB	26-47	150	57	477	316	793	0,36
BA	47-68	240	119	411	230	641	0,49
Bt ₁	68-92	340	94	342	224	566	0,27
Bt ₂	92-147	350	79	348	223	571	0,22
Bt ₃	147+	260	69	410	261	671	0,26

conforme destaca o SiBCS (EMBRAPA, 2006), ao apontar que a estrutura em blocos angulares e subangulares é típica dos Argissolos.

Quanto à composição granulométrica, houve uma tendência de aumento dos teores de argila em profundidade em todos os segmentos de vertente estudados (Tabela 2). Verificou-se incremento nos teores de argila entre os horizontes, fato que possivelmente esteja associado à própria conformação do relevo que favorece esse padrão, conforme destaca (SOUZA et al., 2004). Quanto aos teores da fração areia, verificou-se que a fração areia grossa é pequena em todos os horizontes, chegando a alguns casos, especialmente nos horizontes do Argissolo do sopé, ser zero (0), fato explicado em parte pelo material origem, pois os arenitos do grupo Bauru, Formação Adamantina, apresentam presença majoritária da fração areia fina a muito fina (MONTANARI et al., 2010), sendo a outra contribuição no caso específico do sopé, a sua posição na paisagem (Figura 1).

A relação silte/argila, que auxilia na mensuração do grau de intemperização do solo, apresentou tendência de valores mais homogêneos para os perfis P1 e P2, com valores variando de 0,19 a 0,37 no P1 e 0,15 a 0,19 no P2. Entretanto, vale salientar que o Argissolo do sopé da vertente apresentou um sensível aumento da relação silte/argila, quando comparado aos demais ambientes, com valores variando entre 0,22 a 0,51 (Tabela 2). Este fato pode ser um indicativo do seu menor grau de intemperismo.

Os perfis apresentam classe de reação do solo ácida, com valores de pH variando entre 4,5 e 6,3 (pH em H₂O) e 3,7 e 5,7 (pH em KCl) (Tabela 3). De maneira geral, verificou-se que os valores de pH em água e KCl foram mais baixos

nos horizontes superficiais e tenderam a aumentar em profundidade, independentemente dos segmentos de vertente. Porém, os valores de pH, especialmente em água, foram mais elevados (variando entre 5,1 e 6,1) no segmento de vertente de sopé, sendo este fato devido possivelmente à conformação do relevo (CAMPOS et al., 2007b), que favorece o maior fluxo de água, propiciando assim a maior deposição de sedimentos e nutrientes.

Os teores de matéria orgânica não variaram em função dos segmentos de vertentes e, de maneira geral, observam-se valores mais pronunciados no horizonte superficial, fato associado à deposição de resíduos vegetais oriundos da cobertura vegetal. Quanto à soma de bases (SB), observa-se que os perfis de todos os segmentos de vertente apresentaram comportamento semelhante, com aumento na altura do horizonte B textural, indicando acúmulo de bases trocáveis (Tabela 3). Este padrão possivelmente deve-se às condições de maiores teores de argila, o que não favorece a lixiviação no perfil, além do acúmulo das bases que foram lixiviadas do horizonte superficial, juntamente com a traslocação da argila. Em análise comparativa entre os três ambientes, verificou-se que o perfil do ambiente de sopé apresentou os valores da soma de bases superiores aos demais, indicativo da interferência do fluxo da água no comportamento do atributo do solo; tais valores, segundo Rawls e Pachepsky (2002), devem-se às contribuições dos demais ambientes, via lixiviação das bases trocáveis.

Quanto aos valores V %, expressaram-se de forma similar à soma de bases, pois todos os perfis apresentaram um aumento da saturação por bases nos horizontes diagnósticos subsuperficiais. Entretanto, constatou-se que no perfil do

Tabela 3. Atributos químicos dos Argissolos em diferentes segmentos de vertentes na região de Jaboticabal-SP.

Horiz.	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	MO g kg ⁻¹	Ca	Mg	K	H + Al (cmol _c dm ⁻³)	SB	CTC	V %
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico											
A	4,8	3,8	-1,02	11,1	7,0	1,6	2,0	52	10,6	62,6	17
AB	4,5	3,7	-0,76	9,2	4,0	0,9	1,0	72	5,9	77,9	8
BA	5,5	4,6	-0,95	7,4	19,0	0,9	5,0	28	24,9	52,9	47
Bt ₁	5,9	5,0	-0,91	6,5	20,0	0,5	6,0	28	26,5	54,5	49
Bt ₂	6,2	5,4	-0,81	4,1	16,0	0,5	3,0	15	19,5	34,5	57
Bt ₃	6,3	5,7	-0,57	5,2	12,0	0,4	2,0	15	14,4	29,4	49
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico											
A	4,6	3,9	-0,70	11,5	3,0	1,3	2,0	47	6,3	53,3	12
BA	4,9	4,1	-0,86	9,3	11,0	0,7	3,0	47	14,7	61,7	24
Bt ₁	5,2	4,5	-0,62	5,1	18,0	0,6	5,0	38	23,6	61,6	38
Bt ₂	6,0	5,5	-0,52	5,2	17,0	0,5	2,0	20	19,5	39,5	49
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico											
A	5,3	4,0	-1,28	12,4	11,0	1,6	3,0	47	15,6	62,6	25
AB	5,1	4,0	-1,19	10,3	9,0	0,9	2,0	52	11,9	63,9	19
BA	5,7	4,5	-1,21	7,1	18,0	0,8	4,0	28	22,8	50,8	45
Bt ₁	5,8	4,7	-1,10	8,0	27,0	0,6	4,0	28	31,6	59,6	53
Bt ₂	5,9	5,0	-0,97	5,1	23,0	0,5	4,0	22	27,5	49,5	56
Bt ₃	6,1	5,4	-0,74	3,6	15,0	0,6	5,0	20	20,6	40,6	51

sopé da vertente houve aumento da saturação de bases ($V > 50\%$), acarretando caráter eutrófico, diferentemente dos perfis localizados no topo e na encosta, que apresentaram caráter distrófico (EMBRAPA, 2006). Diversamente, a acidez potencial ($H+Al$) e a capacidade de troca catiônica (CTC) diminuem com a profundidade (Tabela 3), corroborando com os resultados encontrados por Coelho e Vidal-Torrado (2003), que estudaram a gênese de solos originados de Arenito da Formação Adamantina.

Os valores do ataque sulfúrico revelaram que o solo das áreas tem menores teores de SiO_2 quando comparados com os teores de Al_2O_3 , exceção ao Bt_2 do P3, evidenciando a riqueza deste solo em óxidos, como a gibbsita, em comparação das argilas silicatadas, como as caulinitas. No Bt_2 do P3, o acúmulo de sílica favorece a cristalização da caulinita. Os teores de Fe_2O_3 no horizonte A e B definem o solo como hipoférrico (EMBRAPA, 2006).

A composição química da fração terra fina, determinada a partir do ataque sulfúrico, é apresentada na Tabela 4. Os resultados de Ki observados em todos os horizontes dos perfis estudados são inferiores a 2,0.

Os valores de Ki e Kr, em geral, foram baixos (inferiores a 2,00) e semelhantes para todos os solos da sequência (Tabela 4), indicando presença de solos com elevado grau de intemperização, corroborando com resultados encontrados por Campos et al. (2007a), que estudaram solos desenvolvidos de Arenitos da Formação Adamantina na região de Pereira Barreto-SP. Segundo Pai, Wang e Chiu (2007), o grau de intemperismo e a ação dos processos específicos de formação determinaram variações significativas nas características dos solos ao longo da toposequência, demonstrando que o

pedoambiente influencia a estabilidade dos minerais no solo, e as condições de drenagem interna causada pela topografia são um fator crítico na transformação e na redistribuição dos minerais de argila.

Em todos os perfis, os teores de Fe_d e Fe_t são maiores nos horizontes B diagnósticos (Bt) (Tabela 4). Estes resultados podem ser atribuídos ao maior teor de MO em superfície (Tabela 3), o que inibe a cristalização do óxido de Fe (DICK et al., 2005).

Por outro lado, os teores de ferro livre (Fe_d) predominam sobre as formas de ferro mal cristalizadas (Fe_o) para todos os horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais dos perfis estudados, independentemente das formas do relevo. Vale salientar que houve uma sensível diminuição dos teores do Fe_d partindo do topo para o sopé, sendo este fato provavelmente devido à posição da paisagem, já que nos ambientes de sopé ocorre maior acúmulo de água, o que promove a diminuição da cristalização dos óxidos de ferro.

A relação Fe_o/Fe_d apresentou os maiores valores nos horizontes superficiais para todos os perfis estudados (Tabela 4), evidenciando presença de maiores teores do ferro de baixa cristalinidade, fato que está ligado principalmente ao conteúdo de matéria orgânica, que favorece a inibição da cristalização do ferro pedogênico (SILVA et al., 2001). Por outro lado, quando se observam os segmentos de vertente em que ocorrem os perfis, verificou-se que os maiores valores da razão Fe_o/Fe_d são encontrados no topo da paisagem, indicando um maior grau de cristalinidade dos óxidos de ferro nestes solos, quando comparados aos segmentos de encosta e sopé. Tais resultados devem-se, possivelmente, à altura do lençol freático, que se apresenta maior no caso do segmento topo da paisagem.

Tabela 4. Óxidos do ataque sulfúrico (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), ferro livre (Fe_d) e ferro oxalato (Fe_o), e relações entre eles, nos solos dos diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal-SP.

Horiz.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ki	Kr	Fe_d	Fe_o	Fe_o/Fe_d	Fe_d/Fe_t
	g kg ⁻¹					g kg ⁻¹			
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico									
A	41,0	50,0	25,0	1,39	1,05	20,5	3,9	0,19	0,82
AB	45,0	55,0	33,0	1,39	1,00				
BA	65,0	75,0	36,0	1,47	1,12				
Bt_1	77,0	90,0	43,0	1,45	1,11				
Bt_2	74,0	85,0	40,0	1,48	1,14	33,3	3,7	0,11	0,83
Bt_3	65,0	75,0	38,0	1,47	1,11				
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico									
A	40,0	40,0	27,0	1,70	1,18	20,4	3,8	0,18	0,76
BA	69,0	80,0	38,0	1,46	1,12				
Bt_1	63,0	100,0	43,0	1,07	0,83	32,7	3,2	0,09	0,76
Bt_2	89,0	100,0	43,0	1,51	1,18				
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico									
A	22,0	40,0	29,0	0,92	0,63	20,1	3,7	0,18	0,69
AB	40,0	45,0	28,0	1,51	1,08				
BA	52,0	60,0	34,0	1,47	1,08				
Bt_1	104,0	110,0	46,0	1,60	1,26				
Bt_2	108,0	115,0	46,0	1,59	1,27	30,6	3,2	0,10	0,66
Bt_3	68,0	95,0	40,0	1,59	0,95				

A relação Fe_d/Fe_t é um índice auxiliar usado para estimar o grau de desenvolvimento do solo. Constatou-se que os maiores valores foram encontrados nos perfis dos segmentos de vertente de topo e de encosta, quando comparados ao sopé da paisagem (Tabela 4), mostrando que os dois primeiros solos ficaram mais expostos à ação do intemperismo, função da configuração do relevo (CAMPOS et al., 2011), além de o segmento de sopé ter maior proximidade com o lençol freático, desfavorecendo as reações de intemperismo, e também ser área de deposição de sedimentos, visto que no Bt_2 há maior concentração de sílica (SiO_2) do que Al_2O_3 .

Os valores de largura à meia altura (LMA) para a hematita variaram entre os horizontes estudados: para os horizontes A, foram 0,33, 0,31 e $0,27^\circ 2\theta$, respectivamente, para P1, P2 e P3; já para os horizontes Bt, foram 0,30, 0,28 e $0,30^\circ 2\theta$ (Tabela 5). Em relação à largura à meia altura (LMA) da goethita, foram observados, para o horizonte A, valores de 51 para P1, 45 para P2 e $52^\circ 2\theta$ para P3, enquanto que, para o horizonte Bt dos respectivos perfis, os valores de 43, 43 e $46^\circ 2\theta$ (Tabela 5).

O diâmetro médio do cristal (DMC) da hematita para os horizontes A foram 71,29, 79,88 e 84,80 nm, respectivamente, para P1, P2 e P3, enquanto que os horizontes Bt apresentaram valores na seguinte ordem: 90,82, 105,1 e 90,77 nm para P1, P2 e P3. Os resultados de LMA e DMC indicam maior cristalinidade da hematita nos segmentos do topo e da encosta,

e menor cristalinidade no sopé da paisagem, corroborando com Barbieri et al. (2009), que estudaram a mineralogia de solos em diferentes formas do relevo. Além disso, os teores baixos de matéria orgânica, o pH em água ácido e as condições de drenagem desfavoráveis favorecem a cristalização da hematita e o contrário, para a goethita.

A substituição isomórfica (SI) de ferro por alumínio na hematita variou de 0,07 a 10,09 mol% e, de 22,42 a 32,61 mol%, para a goethita. Estes resultados demonstram maior taxa de substituição isomórfica na goethita, independentemente dos segmentos de vertente ocorrente. Segundo Camargo et al. (2008), uma substituição isomórfica dessa natureza é atribuída a goethitas de ambientes que favorecem a baixa atividade de silício e a alta atividade de alumínio.

Em relação aos teores de hematita e goethita (Tabela 5), verificou-se que os menores teores de hematita são encontrados nos horizontes superficiais, fato que possivelmente esteja relacionado aos maiores teores de matéria orgânica, que inibe a cristalização da hematita. Já os teores de goethita exibiram-se bastante homogêneos em todos os horizontes e solos estudados, independentemente dos segmentos de vertente existente, com exceção do horizonte A do P2.

A relação $Gt/(Gt+Hm)$ apresentou maior valor no segmento de vertente de sopé (Tabela 5). Estes resultados são atribuídos aos maiores teores de goethita nos ambientes mais úmidos com restrições de drenagem (sopé), corroborando com

Tabela 5. Atributos cristalográficos dos óxidos de ferro dos perfis estudados nos diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal-SP.

Horiz.	Área do pico		LMA ¹		DMC ²		SI ³		Teor		Gt/(Gt + Hm)
	⁴ Hm (012)	⁵ Gt (110)	Hm (110)	Gt (110)	Hm (110)	Gt (110)	Hm (110)	Gt (110)	Hm	Gt	
	cm ²		°2θ		nm		mol%		g kg ⁻¹		
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico											
A	0,04	0,92	0,33	0,51	71,29	29,88	9,89	25,56	13,95	20,31	0,59
Bt ₂	0,23	1,04	0,30	0,43	90,82	39,02	10,04	32,61	16,65	21,67	0,56
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico											
A	0,36	1,08	0,31	0,45	79,88	36,78	0,07	29,46	12,35	14,26	0,50
Bt ₂	0,27	1,15	0,28	0,43	105,1	32,97	7,21	28,41	18,70	31,20	0,60
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico											
A	0,15	1,02	0,27	0,52	84,80	28,53	7,21	22,42	8,87	23,05	0,70
Bt ₂	0,41	1,04	0,30	0,46	90,77	34,76	1,41	31,92	12,00	25,10	0,67

¹LMA = Largura Meia Altura, ²DMC = Diâmetro Médio do Cristalito, ³SI = Substituição Isomórfica, ⁴Hm = Hematita, ⁵Gt = Goethita.

Tabela 6. Atributos cristalográficos do sistema caulinita-gibbsita dos perfis estudados nos diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal-SP.

Horiz.	Área do pico (cm ²)		¹ LMA (°2θ)		² DMC (nm)		Ct/(Ct + Gb)
	³ Ct-001	⁴ Gb-002	Ct-001	Gb-002	Ct-001	Gb-002	
Topo - P1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico							
A	1,75	0,44	0,75	0,30	14,44	74,04	0,79
Bt ₂	1,90	0,74	0,75	0,30	14,43	74,02	0,72
Encosta - P2 - Argissolo Vermelho Distrófico típico							
A	1,75	0,46	0,75	0,30	14,44	74,04	0,79
Bt ₂	1,44	0,48	0,67	0,30	16,67	74,04	0,75
Sopé - P3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico							
A	1,68	0,40	0,30	0,90	13,10	11,47	0,80
Bt ₂	2,66	0,32	0,70	0,15	9,90	203,60	0,89

¹LMA = Largura Meia Altura, ²DMC = Diâmetro Médio do Cristalito, ³Ct = Caulinita, ⁴Gb = Gibbsita.

Melo et al. (2008), que estudaram o comportamento dos óxidos de ferro em Latossolos sob diversos materiais de origem e encontraram maiores teores de goethita nas posições de baixada, independentemente do material de origem.

A mineralogia da fração argila desferrificada é apresentada na Tabela 6. Independentemente dos segmentos de vertentes, a LMA da caulinita apresentou valores semelhantes (entre 0,30 e 0,75 nm), sendo verificada, também para a gibbsita, a mesma tendência (0,15 a 0,90 nm). Quanto ao DMC da caulinita, variou entre 9,90 e 16,67 nm, enquanto da gibbsita, os valores foram de 11,47 a 203,06 nm. Comportamento semelhante foi observado por Melo et al. (2002) estudando propriedades cristalográficas da caulinita em sedimentos do grupo Barreiras, em Aracruz-ES.

A largura à meia altura das caulinitas, no horizonte A dos perfis P1, P2 e P3, apresentou os valores de, respectivamente, 0,75, 0,75 e 0,30 °2θ; no horizonte Bt₂ foram 0,75, 0,67 e 0,75° 2θ. Para a gibbsita, os valores da LMA foram 0,30, 0,30 e 0,90° 2θ, respectivamente, para P1, P2 e P3 nos horizontes A, enquanto que, para o horizonte Bt₂, verificaram-se valores da ordem de 0,30, 0,30 e 0,15° 2θ, para P1, P2 e P3.

A relação Ct/(Ct + Gb) indica o predomínio da mineralogia gibbsítica nos solos dos segmentos de vertente do topo e da encosta da paisagem, enquanto que, no sopé, domina a mineralogia caulinitica, evidenciando assim que os ambientes mais estáveis da paisagem (topo e encosta) e, portanto, mais intemperizados, apresentam enriquecimento relativo de Gb em relação ao solo do sopé, que apresenta menor ação do intemperismo, podendo assim favorecer a presença de caulinitas.

4 Conclusões

Os atributos físicos e químicos obedeceram ao padrão de exposição dos segmentos de vertente existentes;

O maior grau de cristalinidade dos óxidos de ferro foi observado no topo da paisagem, quando comparado aos ambientes de encosta e sopé;

A mineralogia gibbsítica predominou nos segmentos de topo e encosta da paisagem, enquanto que, no sopé, dominou a mineralogia caulinitica.

Referências

BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; GARSUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. *Scientia Agrícola*, v. 66, p. 819-826, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015>

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*, v. 24, n. 3, p. 23-36, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.004>

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JUNIOR, J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v. 36, n. 6, p. 1749-1755, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000600013>

CAMARGO, L. A.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo: I - Mineralogia da fração argila. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2269-2277, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, n. 106).

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 4, p. 519-529, 2007a. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300012>

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007b.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JUNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C. Relações solo-paisagem em uma topossequência Sobre substrato granítico em Santo Antônio do Matupi, Manicoré (AM). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 13-23, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100002>

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru: II - mineralogia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 5, p. 495-507, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000300011>

CUNHA, P.; MARQUES JUNIOR, J.; CURTI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma seqüência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 3, p. 81-90, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100009>

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. *Z. Geomorphology*, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S. D.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KNABNER, I. K.; MARTIN NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different brazilian ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. *Geoderma*, v. 124, n. 4, p. 319-333, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília: Embrapa, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa, 2006. 354 p.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: I - mineralogia da fração argila. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 5, p. 293-306, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200010>

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, 1981. v. 1, 126 p. Escala - 1:500.000.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 2, p. 209-213, 1998.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e cor em solos caulínicos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 7, n. 1, p. 27-31, 1982.
- KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. New York: John Wiley & Sons, 1954. 716 p.
- KRASILNIKOV, P. V.; CALDERÓN, N. E. G.; SEDOV, S. N.; GÓMEZ, E. V.; BELLO, R. R. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena*, v. 62, n. 1, p. 14-44, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.02.003>
- MAFRA, A. L.; SILVA, E. F.; COOPER, M.; DEMATTE, J. L. I. Pedogênese de uma seqüência de solos desenvolvidos de arenito na região de Piracicaba (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 2, p. 355-369, 2001.
- MELO, F. V.; TOLEDO, F. H.; MOURA, R.; LIMA, V. C.; GHIDIN, A. A. Caracterização química e mineralógica de agregados de diferentes classes de tamanho de Latossolos Bruno e Vermelho localizados no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 67-83, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100008>
- MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SINGH, B.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 53-64, 2002.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Mineralogy*, v. 7, n. 2, p. 317-327, 1960.
- MONTANARI, R.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, p. 191-199, 2010.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *Soil Science Society of America Journal*, v. 12, n. 1, p. 294-306, 1961.
- PAI, C.; WANG, M.; CHIU, C. Clay mineralogical characterization of a toposequence of perhumid subalpine forest soils in northeastern Taiwan. *Geoderma*, v. 138, n. 2, p. 177-184, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.010>
- RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.
- RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Using field topographic to estimate soil water retention. *Soil Science*, v. 167, n. 1, p. 423-435, 2002. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-200207000-00001>
- SAMOUËLIAN, A.; CORNU, S. Modelling the formation and evolution of soils, towards an initial synthesis. *Geoderma*, v. 145, p. 401-409, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.016>
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.
- SCHULZE, D. G. The influence of aluminum on iron oxides: VIII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays and Clay Minerals*, v. 32, n. 2, p. 36-44, 1984. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.1984.0320105>
- SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R. W.; TAYLOR, R. M.; LEWIS, D. J. The influence of aluminum on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al-substituted hematites. *Clays and Clay Minerals*, v. 27, n. 1, p. 105-112, 1979. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.1979.0270205>
- SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO, R. A. M. Estudo de toposequência da baixada litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 4, p. 965-976, 2001.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Irriga*, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2004.