

Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo¹

Sammy Sidney Rocha Matias², José Marques Júnior³, Diego Silva Siqueira³, Gener Tadeu Pereira³

ABSTRACT

Landscape models and magnetic susceptibility on soil identification and characterization

The detailed knowledge of soils and their attributes, across the landscape, is a permanent demand of urban and agro-industrial systems, for planning their sustainable use and occupation. This study aimed at evaluating the potential of landscape models and the magnetic susceptibility in the identification and characterization of oxisols, in Guariba, São Paulo State, Brazil. A total of 514 soil samples were collected in 110.0 ha, at the depths of 0.0-0.20 m and 0.60-0.80 m. Different landscape compartments, based on the geomorphic surface and segment slope models, were identified. In each landscape compartment, trenches were opened for soil classification. The samples were analyzed for particle size and chemical properties, pH (water, CaCl₂ and KCl), organic matter, extractable P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and H⁺ + Al³⁺. The contents of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ and free (Fe_d) and slightly crystallized (Fe_o) Fe oxides were determined in samples from the trenches, as well as the magnetic susceptibility (MS). Taxonomically similar soils, but in different landscape compartments, presented different values for the attributes studied, indicating that the landscape models and magnetic susceptibility may be viable, as a field technique, to help detailing the variation of soil attributes. The magnetic susceptibility showed potential for delimiting geomorphic surfaces mapped in the field, emphasizing its potential use for identifying and characterizing homogeneous areas.

KEY-WORDS: Geomorphology; geomorphic surface; mapping.

RESUMO

O conhecimento detalhado do solo e de seus atributos, ao longo da paisagem, é uma demanda permanente dos sistemas urbanos e agroindustriais, para o planejamento sustentável de uso e ocupação. O presente trabalho objetivou estudar o potencial de modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização de latossolos, em Guariba (SP). Foram coletadas 514 amostras de solo, em 110,0 ha, às profundidades de 0,0-0,20 m e 0,60-0,80 m. Foram identificados diferentes compartimentos de paisagem, com base no modelo de superfície geomórfica e segmento de vertente. Em cada compartimento de paisagem, foram abertas trincheiras, para classificação do solo. As amostras foram analisadas quanto à granulometria e atributos químicos, pH (água, CaCl₂ e KCl), matéria orgânica, P extraível, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e H⁺ + Al³⁺. Também foram determinados os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e óxidos de Fe livres (Fe_d) e pouco cristalizados (Fe_o), nas amostras das trincheiras, além da susceptibilidade magnética (SM). Solos taxonomicamente iguais, porém em diferentes compartimentos da paisagem, apresentaram valores distintos, para os atributos estudados, indicando que os modelos de paisagem e a susceptibilidade magnética podem ser viáveis, como técnica de campo, para auxiliar no detalhamento da variação dos atributos do solo. A susceptibilidade magnética demonstrou ter potencial para delimitação das superfícies geomórficas mapeadas no campo, o que indica o seu potencial de uso, na identificação e caracterização de áreas mais homogêneas.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia; superfície geomórfica; mapeamento.

INTRODUÇÃO

Nos trópicos, os solos de maior ocorrência são os latossolos. Em termos globais, estendem-se por cerca de 750 milhões de ha, sendo que 300 milhões deles localizam-se em território brasileiro. Assim, devido à sua abrangência e à variação de seus atributos, ao longo da paisagem, é de grande importância a sua identificação e caracterização, para o planeja-

mento sustentável de uso e ocupação, pelos sistemas urbanos e agroindustriais. Pesquisas recentes sobre o desenvolvimento de indicadores de impactos globais do uso e ocupação do solo (Rockstrom et al. 2009) descrevem a necessidade deste tipo de estudo.

A caracterização e identificação dos solos e seus atributos pode ser feita de diferentes maneiras. Porém, todas têm como objetivo fornecer o máximo de informações sobre os atributos físicos, químicos

1. Trabalho recebido em jul./2012 e aceito para publicação em mar./2013 (nº registro: PAT 19473).

2. Universidade Federal do Piauí (UFPI), Centro de Ciências Agrárias, Teresina, PI, Brasil. E-mail: ymmsa2001@yahoo.com.br.

3. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, Brasil.

E-mails: diego_silvasiqueira@yahoo.com.br, marques@fcav.unesp.br, genertp@fcav.unesp.br.

e biológicos dos solos. Dentre os critérios de campo utilizados para a caracterização do solo e seus atributos, encontram-se os baseados em um perfil (Campos et al. 2007a e 2012) e em malhas de amostragem, com o emprego da geoestatística (Campos et al. 2007b, Santos et al. 2011) ou modelos de paisagem, como superfícies geomórficas (Campos et al. 2007b, Meireles et al. 2012), formas do relevo e pequenas variações do relevo (Sadiki et al. 2009, Montanari et al. 2010).

A vantagem dos modelos de paisagem é o seu auxílio na identificação de locais com maior ou menor homogeneidade dos atributos do solo, no campo, por meio da identificação do material de origem, estratigrafia e formas de relevo da área (Campos et al. 2007a, Siqueira et al. 2010a). Um destes modelos é o das superfícies geomórficas (SG), definidas como porções de terra delimitadas no tempo e no espaço (Ruhe 1969). Daniels et al. (1971) acrescentam, a esta definição, que as SGs possuem limites geográficos definidos e são formadas por um ou mais agentes (clima, relevo, material de origem), em determinado período de tempo.

Assim, pode-se dizer que diferentes classes de solo, quando localizadas em uma mesma SG, apresentam menor variabilidade, quando comparadas com outro local com o mesmo tipo de solo (Campos et al. 2012). Desta maneira, o interessante seria a caracterização dos atributos do solo dentro de uma mesma SG, além da morfologia no perfil, que é de suma importância para a sua identificação. Campos et al. (2009) relatam que a identificação destas áreas com maior ou menor homogeneidade possibilita o planejamento agrícola com mais eficiência.

Além dos critérios de campo utilizados, a forma de aquisição de informações sobre os atributos químicos e físicos do solo pode gerar conclusões equivocadas. No Brasil, o erro de análises químicas do solo está na faixa de 3-26% e das análises granulométricas de 15-32% (Cantarella et al. 2006). Neste sentido, novas técnicas que contribuam para diminuir estes erros e auxiliem na melhor caracterização dos atributos do solo são necessárias à agricultura moderna. Uma destas técnicas é a medida da susceptibilidade magnética (SM) do solo.

A SM é um atributo do solo que reflete parte da sua composição mineralógica (Souza Júnior et al. 2010). Este atributo já foi utilizado nos primeiros estudos de caracterização qualitativa dos solos do Estado de São Paulo (Resende et al. 1988) e, recen-

temente, por Siqueira et al. (2010b), na caracterização quantitativa e sua relação com atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo.

Santos et al. (2011) concluíram, em seus estudos, que a SM é eficiente na identificação dos compartimentos da paisagem, em uma vertente, podendo ser utilizada na localização de áreas com maior ou menor padrão de variabilidade e possibilitando identificar áreas de manejo específico de maneira mais rápida e econômica, em ambientes semelhantes. Becegato & Ferreira (2005) também identificaram limites entre classes de solos (latossolo, argissolo), com o auxílio da SM.

Assim, este estudo objetivou avaliar o potencial de modelos de paisagem e da susceptibilidade magnética, na identificação e caracterização de latossolos, no município de Guariba (SP).

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área em estudo e sistema de amostragem

O presente estudo foi realizado em uma área de 110,0 ha, localizada no nordeste do Estado de São Paulo (48°09'S, 21°24'W e altitude de 580-680 m), em Guariba (SP), em 2010. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico, com inverno seco (Cwa), temperaturas de 21-27°C e precipitação média de 1.400,0 mm, com chuvas concentradas de novembro a fevereiro. A área encontra-se sob cultivo de cana-de-açúcar há 35 anos consecutivos, com sistema de colheita mecanizado e sem queima. O relevo local é plano a suave ondulado, com declividade variando de 3% a 8%.

A área está inserida no Planalto Ocidental Paulista, no divisor litoestratigráfico arenitobasáltico (IPT 1981). O material geológico da área estudada está relacionado aos arenitos do Grupo Bauru e Formação Adamantina e basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral e material retrabalhado basalto-arenito (IPT 1981). O mapa de solos da área de estudo (escala detalhada de 1:12.000), elaborado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), registra a ocorrência de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de textura média (LVAd) e Latossolo Vermelho distrófico típico de textura média (LVd).

Com o auxílio de GPS (*Global Positioning System*), foi feita uma transeção de 2.700,0 m, ao longo do espigão da vertente, na direção do decaimento mais suave (Figura 1a). Ao longo da transeção,

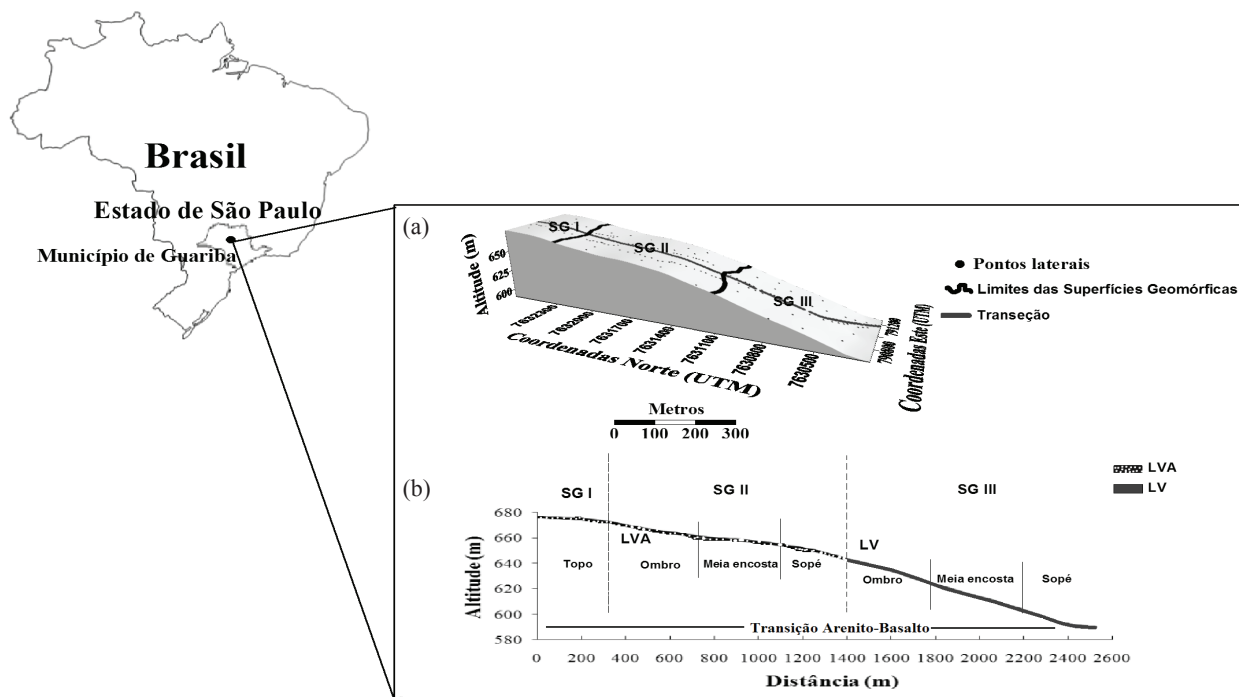


Figura 1. Modelo de elevação topográfico da área de estudo (a) e perfil altimétrico com a identificação das superfícies geomórficas e vertentes (b) (Guariba, SP, 2010). LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de textura média; LV = Latossolo Vermelho distrófico típico de textura média.

o terreno foi estaqueado, em intervalos regulares de 25,0 m, nos quais foram feitas mensurações de altitude, longitude e latitude, utilizando-se o nível topográfico e o GPS.

Foram identificadas e mapeadas (Ruhe 1969, Daniels et al. 1971) três superfícies geomórficas (Figuras 1a e 1b). A superfície geomórfica I (SGI) é considerada a mais velha e de caráter deposicional, que, por possuir menor variabilidade, em relação às demais superfícies geomórficas, apresenta extensão aproximada de 400,0 m, com declividade variando de 0% a 4%. As superfícies geomórficas II (SGII) e III (SGIII) são consideradas erosionais, sendo a SGII um plano de suave inclinação e a SGIII caracterizada por uma declividade mais acentuada (7%), em relação às demais superfícies, estendendo-se até o fim da vertente (sopé).

As unidades de vertente foram classificadas de acordo com Dalrymple et al. (1968) (Figura 1b), sendo mapeados quatro segmentos de vertentes na transeção, proporcionando uma visão mais detalhada da área. Assim, a SGI é constituída pelo topo, a SGII pela ocorrência dos segmentos ombro, meia-encosta e sopé e a SGIII pelo ombro, meia-encosta e um sopé de deposição (Figura 1b).

Em locais representativos das SGs e unidades de vertente (centro de cada), foram abertas sete trincheiras (1,0 m de largura x 2,0 m de comprimento x 2,3 m de profundidade) e os solos descritos morfologicamente (Santos et al. 2005). No fundo das trincheiras, foram coletadas amostras de solo com trado, em intervalos regulares de 0,20-2,20 m de profundidade, a partir da base da trincheira. Foram coletadas 204 amostras na transeção e 310 nas laterais da transeção (58, 148 e 104 amostras, respectivamente na SGI, SGII e SGIII), de forma aleatória, às profundidades de 0-0,20 m e 0,60-0,80 m (Figura 1a).

Metodologia de laboratório e análise estatística

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, com a fração argila sendo pipetada após a sedimentação das frações granulométricas de maior tamanho. A areia grossa (AG) e fina (AF) foram separadas por tamisamento e o silte determinado por diferença (Embrapa 1997).

O pH do solo em água, KCl e CaCl₂ foi determinado utilizando-se a relação solo: água/reagente de 1:2,5. A matéria orgânica, cálcio, magnésio e potássio trocáveis e o fósforo disponível foram quantificados pelo método da resina trocadora de íons (Raij et al. 2001). Com base nos resultados obtidos nas análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). Estas análises foram realizadas em todas as amostras coletadas (perfis e tradagens).

Os teores de óxidos de ferro (Fe₂O₃), Al (Al₂O₃) e silício (SiO₂) analisados na argila foram determinados após ataque sulfúrico (Embrapa 1997). Os óxidos de ferro livres (Fe_d) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson 1960) e determinados por espectrofotometria de absorção atômica (EAA). Os óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o) foram extraídos com oxalato ácido de amônio (OAA) (Camargo et al. 1986) e, também, determinados por EAA. Estas análises foram realizadas nos horizontes A₁ e Bw₂ dos sete perfis.

O valor da SM “χ” foi medido em laboratório, para todas as amostras coletadas (TFSA, areia e argila), utilizando-se balança analítica, de acordo com metodologia de Carneiro et al. (2003) e Cano et

al. (2008), adaptada para leitura da SM do solo por Siqueira et al. (2010b).

O aparato consiste de um imã, suporte para o imã e porta-amostra. A interação entre o imã e os minerais com expressão magnética presentes na amostra de solo gera, na balança, uma força peso. Esta força é, então, convertida em SM, utilizando-se uma curva padrão. A curva é montada utilizando-se a SM tabelada de reagentes puros (Lide 2005). Foi utilizada a mesma curva padrão apresentada por Siqueira et al. (2010b), com base nos reagentes sulfato de zinco (ZnSO₄), sulfato de amônio [(NH₄)₂SO₄], cloreto de potássio (KCl), sulfato ferroso (FeSO₄.7H₂O), sulfato de níquel (NiSO₄) e acetato de sódio (NaCH₃COO).

Os resultados dos atributos físicos, químicos e SM das amostras coletadas nas áreas das SGs (laterais e transeção) foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey, a 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos atributos físicos e químicos dos perfis estudados podem ser observados na Tabela 1. Os valores da composição granulométrica demonstram tendência de aumento nos teores de argila da SGI para SGIII e em profundidade (Horizonte A₁

Tabela 1. Atributos químicos e físicos dos perfis de solos, nas superfícies geomórficas e segmentos de vertentes (Guariba, SP, 2010).

Segmentos de vertentes	Profundidade m	Horizonte	pH			MO g kg ⁻¹	Ca mmol kg ⁻¹	Mg mmol kg ⁻¹	K mmol kg ⁻¹	SB	CTC	V %	AG	AF	Silte g kg ⁻¹	Argila	S/A
			H ₂ O	KCl	ΔpH												
<i>Superfície geomórfica I - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>																	
Topo	0,00-0,15	A ₁	7,4	6,6	-0,8	33,8	57,3	7,4	1,4	66,1	78,0	84	387	262	58	293	0,20
	0,90-1,40	Bw ₂	5,0	4,3	-0,7	11,3	4,5	2,3	0,8	7,6	38,4	19	286	284	69	361	0,19
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>																	
Ombro	0,00-0,20	Ap ₁	6,0	4,9	-1,1	19,3	16,8	5,6	1,7	24,1	51,8	46	307	304	74	315	0,24
	1,20-1,60	Bw ₂	5,1	4,4	-0,7	10,9	1,9	1,0	3,9	6,8	37,7	18	328	228	64	380	0,17
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>																	
Meia-encosta	0,00-0,15	Ap ₁	5,9	4,7	-1,2	16,4	10,1	3,9	2,1	16,1	50,4	32	345	326	71	258	0,28
	1,00-1,50	Bw ₂	5,0	4,4	-0,6	10,1	2,1	0,6	0,0	2,7	40,8	6	291	303	73	333	0,22
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>																	
Sopé	0,00-0,15	Ap ₁	6,5	5,7	-0,8	21,2	24,2	10,7	2,9	37,8	58,0	65	367	298	77	258	0,30
	0,85-1,00	Bw ₂	6,1	5,6	-0,5	10,6	8,5	2,4	0,8	11,7	28,1	41	333	269	59	339	0,18
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>																	
Ombro	0,00-0,20	Ap ₁	6,4	5,5	-0,9	25,3	27,0	9,0	2,4	38,4	63,4	60	388	248	76	288	0,26
	0,85-1,30	Bw ₂	6,5	6,0	-0,5	9,0	11,8	3,3	0,1	15,2	31,6	48	309	243	58	390	0,15
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho eutrófico (LVe)</i>																	
Meia-encosta	0,00-0,15	Ap ₁	6,1	5,1	-1,0	27,1	32,2	9,3	2,3	43,8	78,0	56	312	192	98	398	0,25
	1,00-1,40	Bw ₂	6,5	5,9	-0,6	9,6	18,2	2,9	0,1	21,2	39,5	53	264	182	76	478	0,16
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho eutrófico (LVe)</i>																	
Sopé	0,00-0,20	Ap ₁	6,3	5,5	-0,8	24,1	24,9	11,2	1,7	37,8	65,5	57	481	93	84	342	0,25
	0,90-1,40	Bw ₂	6,0	5,5	-0,5	14,0	26,3	3,3	0,3	29,9	54,9	54	443	85	73	399	0,18

AG = areia grossa; AF = areia fina; S/A = relação silte/argila.

para B_{w2}). Esta variação de argila entre as superfícies geomórficas deve estar associada ao fluxo descendente de água, que favorece o carreamento e a redistribuição de partículas finas nas posições mais baixas da paisagem. Campos et al. (2007a), estudando posições de paisagem em uma litossequência, observaram esta mesma situação, em latossolos.

Com relação aos teores da fração areia (grossa e fina) (Tabela 1), o comportamento, tanto em superfície como em profundidade, foi similar (crescendo da SGI para SGIII e decrescendo da SGI para SGIII, respectivamente), mantendo-se uma pequena variação nos seus teores. Estes resultados são contrários aos obtidos por Montanari et al. (2010) e Meireles et al. (2012), que observaram resultados crescentes dos teores de areia fina e diminuição da areia grossa, em áreas com material de origem do Grupo Bauru e Formação Adamantina, em uma topossequência, na região de Jaboticabal (SP). Verificou-se, ainda, que a relação silte/argila, em todas as SGs, se manteve com tendência à homogeneidade, com valores variando de 0,20 a 0,30, na camada superficial, e de 0,17 a 0,19, à profundidade de 0,80-1,60 m (Tabela 1), indicando o predomínio de solos altamente intemperizados.

Os valores de pH em KCl, nas SGs, apresentaram reações de solos ácidos, variando entre 4,3 e 6,6 (Tabela 1). Observou-se que, em todos os horizontes A_1 e B_{w2} de todas as superfícies estudadas, houve tendência de aumento nos valores de pH, tanto em KCl como em água, este último com valores entre 5,0 e 7,4. Este fato deve-se, possivelmente, ao aumento considerável dos teores de cálcio resultante da hidrólise do calcário, que promoveu a neutralização do alumínio no solo, pela liberação de OH^- , favorecendo a dissolução e percolação de constituintes minerais e orgânicos, conforme destaca Campos et al. (2007b).

Os teores de matéria orgânica variaram em função da profundidade (Tabela 1), com valores mais altos no horizonte superficial para todas as trincheiras e, principalmente, na SGI. Quanto à soma de bases (SB), observou-se que os perfis das superfícies geomórficas mantiveram comportamentos semelhantes ao da matéria orgânica, indicando forte influência da adubação mineral feita nesta área (Tabela 1).

Os teores de argila e saturação por bases (V%) determinados não corroboram os valores destes atributos registrados no levantamento de solos realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), na mesma área (escala detalhada de 1:12.000). Segundo

o mapa de solos, as ocorrências, na área, são de solos pertencentes à classe de textura média (teor de argila de 150,0-350,0 g kg⁻¹). Porém, observando-se a Tabela 1, nota-se que os solos da SGI e SGIII encontram-se na classe argilosa (teor de argila de 350,0-600,0 g kg⁻¹). A caracterização mais detalhada da área indica que existem solos na SGIII que se enquadram como eutróficos. Isto mostra a necessidade de uma maior caracterização dos solos existentes, levando-se em conta modelos de paisagem, pois permitem uma melhor definição das classes de variação (limite superior e inferior) do atributo, para um dado local.

Por outro lado, a capacidade de troca catiônica (CTC) diminuiu com a profundidade (Tabela 1), corroborando os resultados encontrados por Meireles et al. (2012), que afirmam que solos desenvolvidos a partir de basalto-arenito apresentam menor CTC potencial em profundidade. Os valores mais elevados no horizonte superficial estão relacionados, provavelmente, a maiores teores de matéria orgânica, que, segundo Dalmolin et al. (2006), influenciam no comportamento dos nutrientes, no solo.

A comparação entre as médias de todos os atributos químicos e granulométricos estudados nas SGs e as profundidades não permitiu diferenciar as três SGs (Tabela 2).

Resultados semelhantes foram verificados por Campos et al. (2007a) e Meireles et al. (2012), para os atributos areia total, argila, pH, teor de matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca de cátions e saturação por bases, em latossolos de diferentes SGs. Outros estudos creditam a variação dos atributos químicos e físicos do solo, ao longo da vertente, como sendo expressão do material de origem e relevo (Campos et al. 2007a, 2007b e 2012, Montanari et al. 2010, Meireles et al. 2012).

A relação silte/argila apresentou valores baixos em todas as SGs (Tabela 2), caracterizando solos altamente intemperizados. Observou-se, também, que a relação silte/argila é menor na SGI, identificando ser esta a superfície mais intemperizada, como demonstrado pelo menor valor de K_i (Tabela 3). Campos et al. (2007a) e Meireles et al. (2012) obtiveram resultados semelhantes.

A SM foi o único atributo do solo que separou as três superfícies geomórficas, apresentando diferença significativa ($p < 0,05$) (Tabela 2). Este resultado confirma a utilidade do uso conjunto do conceito de superfícies geomórficas (Ruhe 1969, Daniels et al. 1971) e das medidas de SM (Becegato & Ferreira

Tabela 2. Atributos químicos, físicos e susceptibilidade magnética dos solos estudados (Guariba, SP, 2010).

Superfícies geomórficas	Atributos químicos					Atributos granulométricos			SM 10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹
	pH CaCl ₂	MO	SB	CTC	V	AT	ARG	S/A	
		g dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	—	%	—	g kg ⁻¹	—	
<i>Profundidade de 0-0,20 m</i>									
SGI	5,5a	20,8b	61,4a	81,3a	74a	596a	368b	0,26a	2,7c
SGII	5,1b	19,3b	38,4b	68,0b	57b	612a	351b	0,28a	4,4b
SGIII	5,0b	23,0a	38,7b	73,3b	52b	520b	437a	0,28a	7,7a
<i>Profundidade de 0,60-0,80 m</i>									
SGI	4,1b	11,3a	11,3a	59,6a	20a	548a	419b	0,22a	2,3c
SGII	4,4ab	9,4b	14,0a	52,7b	28a	546a	424b	0,21a	4,3b
SGIII	4,6a	10,4b	17,2a	51,0b	33a	452b	509a	0,23a	7,4a

ARG = argila; AT = areia total; S/A = relação silte/argila; SM = susceptibilidade magnética; MO = teor de matéria orgânica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; SGI = superfície geomórfica I; SGII = superfície geomórfica II; SGIII = superfície geomórfica III. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

2005, Santos et al. 2011), para identificar e mapear compartimentos mais homogêneos.

Sadiki et al. (2009) e Souza Júnior et al. (2010) relataram que a magnitude da SM medida no solo depende da variabilidade do material de origem e dos processos pedogenéticos. Becegato & Ferreira (2005) identificaram limites entre classes de solos (Nitossolo, Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutrófico), com o auxílio da SM, concluindo ser uma ferramenta importante na análise e descrição detalhada de áreas homogêneas. Santos et al. (2011), utilizando a técnica da SM, obtiveram os mesmos resultados, na identificação de compartimentos geomorfológicos, no município de Gilbués (PI).

Os resultados dos teores dos óxidos de silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃) (Tabela 3) indicam a evolução do processo de intemperismo do solo, com decréscimo nos valores do Horizonte Bw₂ para o A₁, nas vertentes, topo, ombro, meia-encosta e sopé, e uma inversão dos valores (acrécimo) no sopé da SGII, indicando uma transição de tipos de solos e grau de evolução. Além disto, os valores de SiO₂ e Al₂O₃ obtidos na SGIII comprovam que este tipo de solo é mais jovem do que o da SGI e de caráter deposicional, pois o silício é um elemento passível de ser removido do sistema (solo), no decorrer do processo de intemperização (Moreira & Oliveira 2008). Segundo Novaes Filho et al. (2012), uma sequência normal de intemperismo da rocha para o solo deve mostrar alterações na concentração dos componentes químicos, em concordância com a acumulação relativa dos elementos menos móveis, com a perda daqueles mais solúveis e de maior mobilidade.

Os teores de óxidos de ferro extraídos pelo ataque sulfúrico (Fe_s) (Tabela 3) aumentaram nos solos da SGI para a SGIII (48,1 g kg⁻¹ a 96,2 g kg⁻¹), concordando com o teor de argila (Tabela 2). Isto pode ser explicado pela origem arenítica, seguindo a vertente na direção das rochas basálticas, na encosta inferior, e, também, pelo fato de a SGIII ser classificada como deposicional. Estes resultados estão de acordo com Campos et al. (2012), que estudaram a relação solo-superfície geomórfica, em uma toposequência, no município de Humaitá (AM). Meireles et al. (2012) observaram os mesmos resultados, em estudo envolvendo relações solo-paisagem, em toposequência de origem basáltica.

Moreira & Oliveira (2008) descrevem que a utilização de certos atributos geoquímicos (SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃), na identificação do grau de intemperismo do solo, baseia-se na ideia de que, em locais de deposição residual, os teores dos atributos geoquímicos são consequência do intemperismo diferencial e da lixiviação, que permitem que elementos mais solúveis, como o SiO₂, na forma de H₄SiO₄⁻, sejam mais facilmente removidos do que os óxidos de ferro e alumínio.

Nas amostras dos perfis, observou-se aumento nos valores de Ki, da SGI para SGIII, indicando maior dessilicatização relativa na SGI, considerada deposicional, e maior presença de minerais cauliniticos na SGIII (Tabela 3). Campos et al. (2007a), estudando uma litosequência arenito-basáltica, propuseram modelo de relação solo-paisagem muito próximo aos encontrados neste estudo.

A relação sílica/alumina (Ki) é utilizada para separar ou identificar solos com B latossólico e serve, também, para estabelecer o limite entre solos muito

Tabela 3. Atributos químicos dos perfis de solos, em diferentes superfícies geomórficas e segmentos de vertentes (Guariba, SP, 2010).

Segmentos de vertentes	Profundidade m	Horizonte	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ki	Kr	Fe _o	Fe _d	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _s
			g kg ⁻¹					g kg ⁻¹			
<i>Superfície geomórfica I - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>											
Topo	0,00-0,15	A ₁	32,5	48,1	35	1,58	1,61	6,1	41,9	0,15	0,87
	0,90-1,40	Bw ₂	39,5	58,1	55	1,22	1,26	5,9	49,5	0,12	0,85
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>											
Ombro	0,00-0,20	A ₁	35,0	59,4	40	1,49	1,52	6,0	65,4	0,09	0,93
	1,20-1,60	Bw ₂	45,0	65,8	55	1,39	1,43	6,7	67,0	0,10	0,83
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>											
Meia-encosta	0,00-0,15	A ₁	29,0	50,0	25	1,97	2,00	3,2	45,0	0,07	0,90
	1,00-1,50	Bw ₂	43,0	61,3	40	1,83	1,87	7,4	54,5	0,14	0,89
<i>Superfície geomórfica II - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>											
Sopé	0,00-0,15	A ₁	36,0	46,9	30	2,04	2,07	3,9	58,3	0,07	0,96
	0,85-1,00	Bw ₂	33,5	50,6	45	1,27	1,30	8,7	61,5	0,14	0,99
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)</i>											
Ombro	0,00-0,20	A ₁	34,0	52,5	35	1,65	1,68	3,0	46,3	0,06	0,88
	0,85-1,30	Bw ₂	58,0	68,9	50	1,97	2,02	6,3	61,7	0,15	0,90
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho distrófico (LVd)</i>											
Meia-encosta	0,00-0,15	A ₁	45,0	82,1	50	1,53	1,58	2,7	64,7	0,04	0,79
	1,00-1,40	Bw ₂	61,0	96,2	55	1,89	1,95	9,5	71,3	0,13	0,74
<i>Superfície geomórfica III - Latossolo Vermelho distrófico (LVd)</i>											
Sopé	0,00-0,20	A ₁	33,5	54,4	30	1,90	1,93	7,1	75,7	0,09	0,90
	0,90-1,40	Bw ₂	47,0	62,7	40	2,00	2,04	8,8	85,7	0,10	0,92

SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ = teores de óxidos totais no extrato sulfúrico; Ki = SiO₂/Al₂O₃ * 1,75; Kr = SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃; Fe_s = teores de ferro total; Fe_d = teores de óxidos de ferro cristalizados; Fe_o = teores de óxidos de ferro pouco cristalizados.

intemperizados (Ki < 2) e pouco intemperizados (Ki > 2,2). No estudo, também foi verificada relação sílica/óxidos de ferro e alumínio (Kr), na qual se observa o mesmo comportamento Ki. Ressalta-se que o índice Kr serve para separar solos cauliniticos (Kr > 0,75) de solos oxidíricos (Kr < 0,75), indicando o grau de evolução da intemperização do solo.

Os teores de Fe_d variaram de 41,9 g kg⁻¹ a 85,7 g kg⁻¹, com os valores mais elevados registrados nas amostras da SGIII, caracterizando ser este o ambiente mais propício à cristalização dos óxidos de ferro (hematita), por estar próximo a rochas basálticas. A relação Fe_o/Fe_d (Tabela 3) variou de 0,04 a 0,15, evidenciando a presença de maiores teores do ferro cristalino (hematita), indicando a presença de minerais de baixa cristalinidade. Tal comportamento também foi observado por Campos et al. (2012) e Meirelles et al. (2012), em uma topossequência de solos classificados como latossolos. Campos et al. (2012) salientam que a presença de óxidos de ferro (provavelmente a ferridrita) é indicativo de menor grau de cristalinidade.

A relação Fe_d/Fe_s variou entre 0,74 e 1,00, permitindo a estimativa do ferro (Fe) em minerais secundários e primários. Nas amostras dos perfis

(Tabela 3), verificam-se valores decrescentes da SGI para a SGIII, o que não está em consonância com os resultados encontrados por Campos et al. (2007a) e Meirelles et al. (2012), em áreas de transição arenito-basalto, confirmando as premissas de Daniels et al. (1971), quando afirmaram que os solos têm a idade da superfície geomórfica onde eles ocorrem.

Os valores obtidos pela relação Fe_d/Fe_s, neste estudo, estão próximos aos obtidos por Montanari et al. (2010), em latossolos do nordeste do Estado de São Paulo (0,68 a 0,85); Dalmolin et al. (2006), em Latossolos Vermelhos do planalto do Rio Grande do Sul (0,7 a 1,0); Campos et al. (2012), em Latossolos Vermelhos do município de Humaitá, AM (0,62 a 0,93); e Meirelles et al. (2012), em Latossolos Vermelhos distroféricos de Batatais, SP (0,70 a 0,85), indicando o alto grau de evolução destes solos.

Na Figura 2, é demonstrado o comportamento da fração areia e argila e a relação areia fina e areia grossa (AF/AG) dos perfis, nas diferentes superfícies e compartimentos da vertente. A quantificação dos valores da fração areia e argila (Figura 2a), ao longo dos perfis, indica que os solos presentes na SGI apresentam comportamento mais homogêneo do que os presentes na SGIII, fato confirmado, tam-

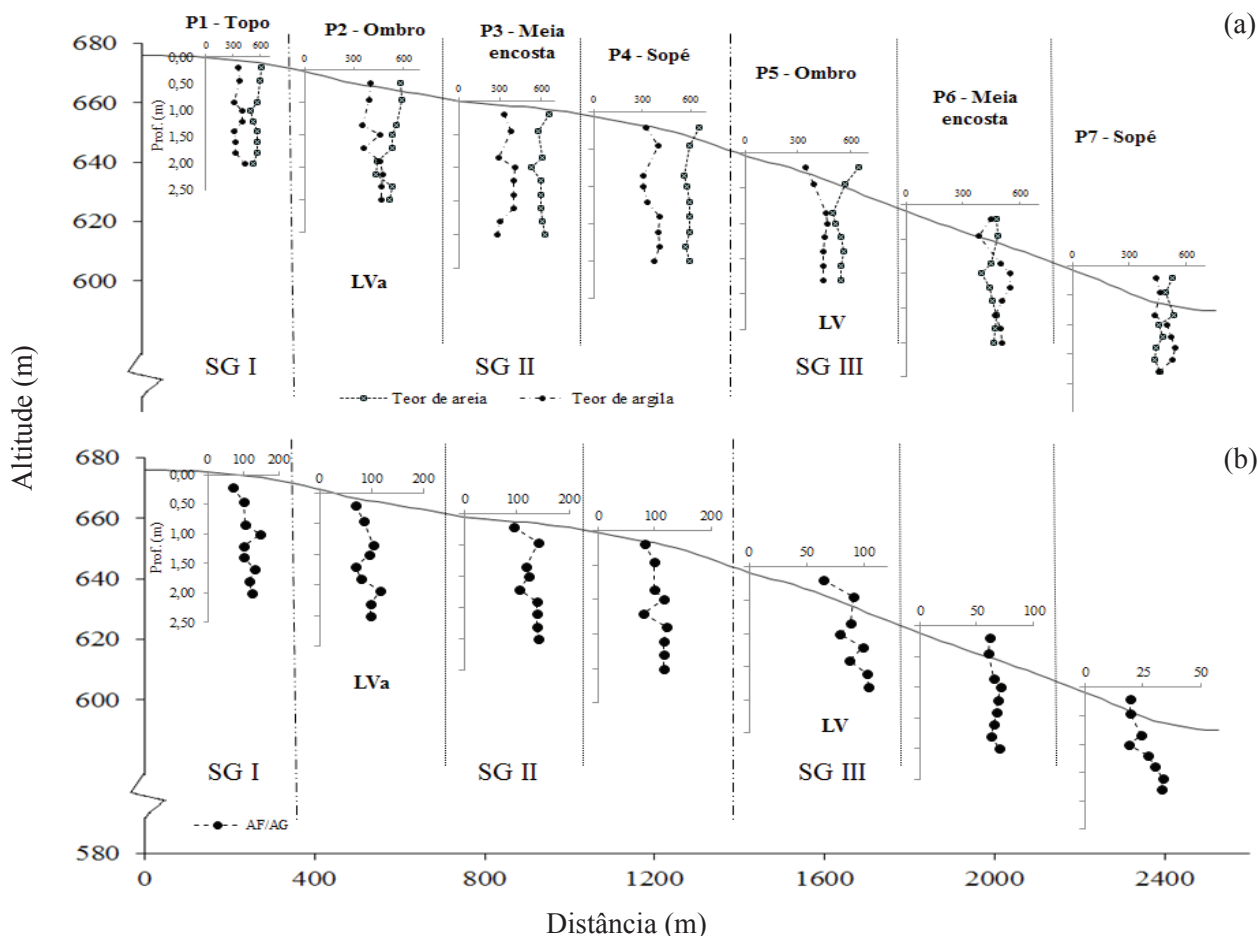


Figura 2. Comportamento da fração areia (g kg^{-1}) e argila (g kg^{-1}) (a) e a relação entre areia fina e areia grossa (AF/AG) (b) dos perfis (Guariba, SP, 2010).

bém, pelos valores mais altos de areia. Campos et al. 2007b, Mendes et al. (2008) e Cajazeira & Assis Júnior (2011), estudando o comportamento da textura como indicador de maior ou menor homogeneidade, observaram que a granulometria pode ser utilizada como indicador de evolução do solo.

A relação areia fina/areia grossa (AF/AG) apresentou diminuição nos valores da SGI para SGIII, evidenciando a transição do arenito (topo) para a base. Esta relação infere ao solo a característica de maior ou menor grau de intemperização (quanto maior a relação, maior é o grau de meteorização). Ressalta-se que tal relação está associada ao valor K_i , como forma de confirmar esta maior evolução do solo. Esta tendência é reforçada pelo aumento nos teores de ferro total e SM (Tabelas 2 e 3), influenciados por solos de basalto, no final da encosta. Novaes Filho et al. (2012) concluíram que a relação AF/AG pode indicar a descontinuidade do material

de origem e, também, de áreas com mais e menos homogeneidade.

A quantificação dos valores da textura do solo pode indicar qual mineral ferrimagnético, como a magnetita (fração areia) e a maghemita (fração argila), está inferindo nos valores da SM (Souza Júnior et al. 2010). A SM do perfil 1 confirma que a SGI é mais antiga, em virtude da maior homogeneidade dos valores em profundidade, fato não observado no perfil 7 (Figura 3).

De acordo com Sadiki et al. (2009), Santos et al. (2011) e Souza Júnior et al. (2010), a susceptibilidade magnética é um atributo do solo que reflete a composição de minerais ferrimagnéticos, nas diferentes frações do solo, indicando o grau de evolução dos processos pedogenéticos. De acordo com Souza Júnior et al. (2010), os óxidos de ferro são o segundo grupo de minerais mais presentes na fração argila, principalmente em latossolos.

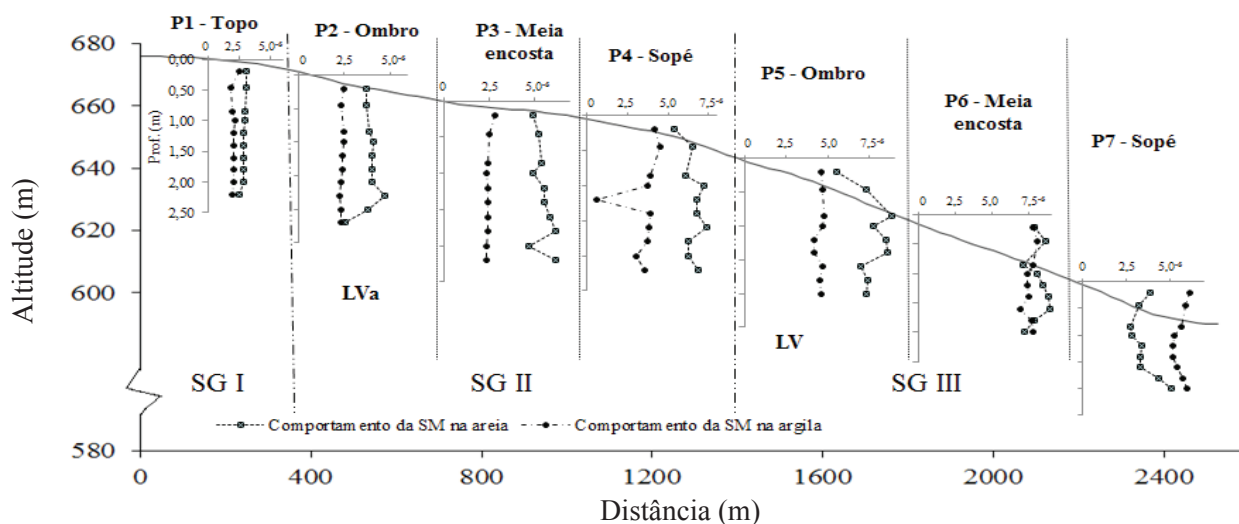


Figura 3. Susceptibilidade magnética ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) nas frações areia e argila, nos perfis dos solos estudados (Guariba, SP, 2010). Linhas pontilhada e tracejada separam as superfícies geomórficas (SG) e indicam o início do Latossolo Vermelho. P = Perfil.

A SM dos perfis 2; 3; e 4, ao longo da SGII, confirma o caráter erosional desta área de transição entre solos (LVAd e LVd). A SM dos perfis 5; 6; e 7 confirma a maior variabilidade do solo, provavelmente devido ao material de origem. Estes resultados reforçam o potencial de uso da SM, para melhorar a precisão dos limites entre áreas mapeadas (Zawadzki et al. 2011), principalmente em áreas de transição arenito-basalto. Nestes locais, muitas vezes, a interpretação da variabilidade do solo, por meio de sua cor, gera conclusões equivocadas. Isto interfere nos estudos de causa e efeito, sobre a resposta das culturas agrícolas e o ambiente em que estão inseridas (Campos et al. 2009).

Observa-se, ainda, que a variação da SM, na fração argila (Figura 3), segue a dos teores de Fe_2O_3 e argila, nos perfis (Tabela 3 e Figura 2). Este resultado está de acordo com Resende et al. (1988), quando observaram que a SM estava relacionada, diretamente, com o teor de Fe_2O_3 total do solo.

Segundo Fontes et al. (2000), valores de SM entre 1 e $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ são característicos de solos originados de transições arenito-basalto. De acordo com Souza Júnior et al. (2010), solos com elevados valores de SM, normalmente, apresentam elevado potencial agrícola, pelo fato de os minerais ferrimagnéticos serem capazes de reter quantidades consideráveis de Mn, Cr, V, Ni, Cu e Zn. Becegato & Ferreira (2005), Souza Júnior et al. (2010) e Santos et al. (2011) identificaram os limites e o comportamento mineralógico do solo, com o auxílio da SM,

por meio da sua correlação com os teores de argila do solo, constituindo uma ferramenta importante na análise e descrição detalhada de áreas homogêneas.

Na fração areia, a SM apresentou variações no perfil semelhantes às da argila, porém, com valores superiores (Figura 3). Isto indica a provável presença de maiores quantidades de minerais ferromagnéticos na fração areia, possivelmente magnetita (Fontes et al. 2000, Souza Júnior et al. 2010).

A SM, nas frações areia e argila, também aumentaram da SGI para a SGIII, exceto no perfil 7 da SGIII. A diminuição nos valores da SM, neste perfil, foi maior na areia, possivelmente pelo efeito de redução causado pela menor condição de drenagem, evidenciado pela manifestação de cores mais acinzentadas dos solos, nesta posição da vertente, condicionando o impedimento da formação dos minerais ferrimagnéticos, formados durante a oxidação do Fe II a Fe III, no solo (Fontes et al. 2000, Souza Júnior et al. 2010).

A SM dos perfis localizados na SGII e SGIII aumenta com a profundidade do solo, indicando a influência da argila (Figura 3). Segundo Fontes et al. (2000) e Souza Júnior et al. (2010), a SM é um atributo covariativo do material de origem, mesmo quando o enriquecimento é maior nas camadas superiores do solo. Para Resende et al. (1988), Fontes et al. (2000) e Souza Júnior et al. (2010), os teores de maghemita influenciam grandemente a SM, em solos originados de arenitos. Sadiki et al. (2009) também observaram variações na SM, ao longo de

uma topossequência, no Marrocos. Estas variações foram relacionadas com as diferenças na composição original magnética e a influência de fatores de erosão, que são condicionados pela pedofoma do terreno.

CONCLUSÕES

1. Solos taxonomicamente iguais, porém em diferentes compartimentos da paisagem, apresentaram valores distintos, para os atributos estudados, indicando que os modelos de paisagem e a susceptibilidade magnética podem ser viáveis, como técnica de campo, para auxiliar no detalhamento da variação dos atributos do solo.
2. A susceptibilidade magnética demonstrou ter potencial para delimitação das superfícies geomórficas mapeadas no campo, o que indica seu potencial de uso na identificação e caracterização de áreas mais homogêneas e ambientes semelhantes.

REFERÊNCIAS

- BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 371-405, 2005.
- CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um argissolo no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.
- CAMARGO, O. A. et al. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. (Boletim técnico, 106).
- CAMPOS, M. C. C. et al. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto - SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 519-529, 2007a.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007b.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 297-304, 2009.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea-terra firme na região de Humaitá (AM). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 325-336, 2012.
- CANO, M. E. et al. Understanding the magnetic susceptibility measurements by using an analytical scale. *European Journal of Physics*, Bologna, v. 29, n. 2 p. 345-354, 2008.
- CANTARELLA, H. et al. Variability of soil analysis in commercial laboratories: implications for lime and fertilizer recommendations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, London, v. 37, n. 15-20, p. 2213-2225, 2006.
- CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da susceptibilidade magnética usando uma balança analítica. *Química Nova*, São Paulo, v. 26, n. 6, p. 952-956, 2003.
- DALMOLIN, R. S. D. et al. Organic matter characteristics and distribution in ferralsol profiles of a climosequence in southern Brazil. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 57, n. 4, p. 644-654, 2006.
- DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land-surface model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Berlin, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.
- DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 23, n. 1, p. 51-87, 1971.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- FONTES, M. P. F. et al. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81-99, 2000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1981. v. 1. Escala 1:500.000.
- LIDE, D. R. Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds. In: HAYNES, W. M. (Ed.). *CRC handbook of chemistry and physics*. 86. ed. Boca Raton: CRC, 2005. p. 130-135.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAYS MINERALS, 7., 1960, Washington, DC. *Proceedings...* New York: Pergamon Press, 1960. p. 317-327.
- MEIRELES, H. T. et al. Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 129-136, 2012.

- MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do deserto salino, no Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, n. 1, p. 19-27, 2008.
- MONTANARI, R. et al. Caracterização mineralógica de latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 191-199, 2010.
- MOREIRA, H. L.; OLIVEIRA, V. A. Evolução e gênese de um Plintossolo Pétrico concrecionário eutrício argissólico no município de Ouro Verde de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1683-1690, 2008.
- NOVAES FILHO, J. P. et al. Indicativos de descontinuidade litológica de regolitos derivados de granitos em uma microbacia sob floresta amazônica, em Juruena - MT. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 317-324, 2012.
- RAIJ, B. V. et al. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. São Paulo: IAC, 2001.
- RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em latossolo do Sudeste e Sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS/SBCS, 1988. p. 233-258.
- ROCKSTROM, J. A. et al. Safe operating space for humanity. *Nature*, New York, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009.
- RUHE, R. V. *Quaternary landscape in Iowa Ames*. Iowa: State University Press, 1969.
- SADIKI, A. et al. Using magnetic susceptibility to assess soil degradation in the Eastern Rif, Morocco. *Earth Surface Processes and Landforms*, Malden, v. 34, n. 15, p. 2057-2069, 2009.
- SANTOS, H. L. et al. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 6, n. 4, p. 710-716, 2011.
- SANTOS, R. D. et al. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.
- SOUZA JÚNIOR, I. G. et al. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma*, Oxford, v. 155, n. 1, p. 55-66, 2010a.
- SIQUEIRA, D. S. et al. Correlation of properties of Brazilian haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010b.
- ZAWADZKI, J. et al. Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility. *Environmental Monitoring and Assessment*, Warsaw, v. 184, n. 5, p. 1-12, 2011.