

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO EM CITRICULTURA**

LUCAS AGUILAR CORTEZ<sup>1</sup>, JOSÉ MARQUES JÚNIOR<sup>2</sup>, RAFAEL GONÇALVES PELUCO<sup>3</sup>, DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA<sup>4</sup> & DIEGO SILVA SIQUEIRA<sup>5</sup>

---

**RESUMO:** A agricultura necessita de informações detalhadas sobre a variabilidade das relações de causa e efeito entre os atributos do solo e as culturas agrícolas. Muitas vezes a dificuldade em se obter este tipo de informação está no número de amostras requeridas nesses estudos. O objetivo deste trabalho foi utilizar a suscetibilidade magnética (SM) para predizer atributos do solo e da planta cítrica de forma a facilitar a identificação de áreas específicas de manejo para a cultura da laranja. A área de estudo localiza-se no município de Gavião Peixoto SP, em ocorrência de Latossolo Vermelho distrófico, no qual está instalado há 14 anos um pomar de laranja pêra-rio sobre limão cravo. Uma malha de amostragem foi delineada a intervalos regulares de 50 m, perfazendo um total de 312 pontos, em uma área de 93,58 ha. Foram analisados atributos químicos e físicos do solo e atributos referentes à planta. Os dados foram analisados utilizando a geoestatística e a estatística multivariada. Os resultados permitiram concluir que a suscetibilidade magnética mostrou-se como uma ferramenta promissora na identificação de áreas com maiores potenciais produtivos.

**Palavras-chave:** Geoestatística, variabilidade espacial, quantificação indireta.

---

<sup>1</sup> Eng. Agrônomo Mestrando, FCAV-UNESP/Solos e Adubos, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, cep.14884-900, Jaboticabal, [cortez.lucas@ig.com.br](mailto:cortez.lucas@ig.com.br)

<sup>2</sup> PROF assistente doutor, FCAV-UNESP/Solos e Adubos, [marques@fcav.unesp.br](mailto:marques@fcav.unesp.br)

<sup>3</sup> Eng. Agrônomo Mestrando, FCAV-UNESP/Solos e Adubos, [rgpeluco@hotmail.com](mailto:rgpeluco@hotmail.com)

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo Mestrando, FCAV-UNESP/Ciências exatas, [daniel.dbt@hotmail.com](mailto:daniel.dbt@hotmail.com)

<sup>5</sup> Eng. Agrônomo Doutorando, FCAV-UNESP/Solos e Adubos, [diego\\_silvasiqueira@yahoo.com.br](mailto:diego_silvasiqueira@yahoo.com.br)

## MAGNETIC SUSCEPTIBILITY TO IDENTIFY AREAS OF SPECIFIC MANAGEMENT IN CITRUS

**SUMMARY:** Agriculture needs detailed information about the variability of cause and effect relationships between soil properties and agricultural crops. Often the difficulty in obtaining such information is in the number of required samples in these studies. The objective of this study is to use the magnetic susceptibility (MS) to predict soil attributes and citrus trees in order to facilitate the identification and development of specific areas of management. The study area is located in the municipality of Gavião Peixoto, SP, under the occurrence of an Oxisol, which is installed an orchard of pêra-rio orange under limão cravo for 14 years. A sampling grid was drawn at regular intervals of 50 m, a total of 312 points in an area of 93.58 hectares. We analyzed the chemical and physical attributes related to soil and plant. Data were analyzed using geostatistics and multivariate statistics. The results indicate that the magnetic susceptibility proved to be a promising tool in identifying areas with higher productive potential.

**Keywords:** Geostatistics, spatial variability, indirect quantification.

### 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda em agricultura sustentável e a constante busca em incrementos de produção, os levantamentos de solos não podem mais se restringir somente a gerar dados sobre a distribuição geográfica das propriedades que compõe a classe do solo, mas sim, prover a distribuição espacial quantitativa e qualitativa das propriedades destes solos.

Segundo Frogbrook & Oliver (2007) o mapeamento da variabilidade dos atributos do solo é fundamental para o planejamento sustentável das práticas agrícolas. Vários estudos indicaram que numa mesma unidade de mapeamento de solo, existe considerável variabilidade espacial dos atributos (LIMA & SILANS, 1999; CAMARGO et al. 2008).

Segundo Legros (2006) cinco procedimentos podem ser utilizados na identificação e mapeamento de solos e seus atributos: (a) mapeamento pela similaridade de diferentes piuns (mapeamento por malha de observações); (b) mapeamento livre ou categórico, onde são utilizados conceitos de relação solo-paisagem; (c) mapeamento utilizando análise geoestatística; (d) mapeamento utilizando à lógica fuzzy; (e) classificação pela capacidade de uso da terra.

Mais recentemente alguns pesquisadores (CAMARGO et al., 2008) têm proposto novas abordagens para caracterizar os solos e seus atributos utilizando simultaneamente métodos determinísticos (simi-

laridade entre pedons, modelos de paisagem) e métodos estocásticos (geoestatística). A união destes métodos gera um novo tipo de mapeamento, denominado híbrido. Segundo McBratney et al. (2000), esse tipo de mapeamento melhora o conhecimento da distribuição dos solos e seus atributos ao longo da paisagem (variabilidade espacial), da precisão e da qualidade da informação, pois diminui a subjetividade apresentada nos métodos tradicionais.

A técnica do mapeamento híbrido tem sido utilizada com êxito na caracterização de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (CAMARGO et al., 2008), planejamento agrícola e implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2008), estudo da emissão de CO<sub>2</sub> (PANOSSO et al., 2009), adsorção de fósforo (BARBIERI et al., 2009), produção de café (SANCHEZ et al., 2005) e cultivo de citros (SIQUEIRA et al., 2010b). Dessa maneira, esses trabalhos podem ser utilizados para nortear a identificação de limites entre áreas com diferentes padrões de variabilidade no campo. Porém, a precisão e exatidão desses procedimentos são relacionadas com o número de pontos de observação, que causam a elevação do custo destes mapeamentos.

A coleta de amostras é a etapa mais intensiva e onerosa na avaliação quantitativa dos atributos do solo para o planejamento agrícola (McBRATNEY et al., 2002). Dessa maneira, alguns pesquisadores têm utilizado a susceptibilidade magnética (SM) (GRIMLEY & VEPRASKAS, 2000; SIQUEIRA et al., 2010b) na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e especialmente mineralógicas do solo, visto que estas requerem análises laboratoriais e interpretações mais complexas do que outras.

A SM é um atributo das rochas, sedimentos e o solo, cuja magnitude depende da concentração e das características dos minerais, tais como: composição, estrutura espacial e tamanho do cristal (VEROSUB & ROBERTS, 1995). Segundo Maher & Thompson (1999), os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo.

A SM surgiu como método alternativo a análises de solo, basicamente para buscar respostas a dois propósitos, entender o clima pretérito em locais de ocorrência dos paleosolos (MAHER & THOMPSON 1999) e identificar áreas de poluição no solo (PETROVSKY & ELLWOOD 1999; LECOANET et al. 2001). Devido seu potencial de predição de outros atributos do solo, autores sugerem a utilização da SM em levantamentos de solo (RESENDE et al. 1988) e quantificação indireta de atributos físicos, químicos e mineralógicos (SIQUEIRA et al., 2010b).

O resultado da interação do conjunto de fatores de formação do solo como material de origem, clima, relevo, tempo, flora e fauna, é expresso por meio da variabilidade espacial dos atributos que o compõem. Desta forma a SM varia com a topografia, clima, biodiversidade, fluxo de água e ação antrópica (EYRE & SHAW, 1994; SINGER et al., 1996; DE JONG et al., 2000).

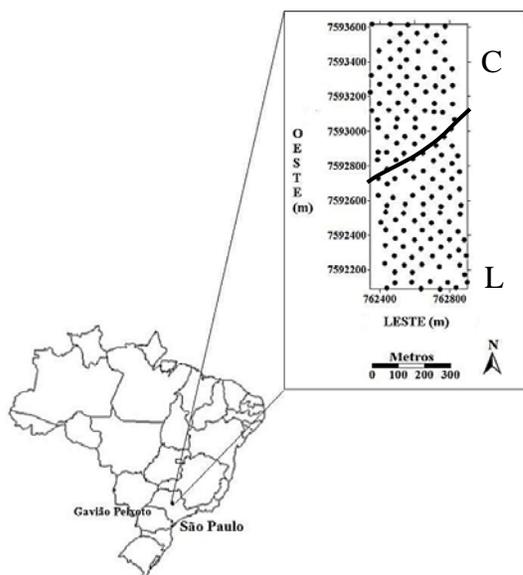
Segundo Dearing et al. (1996), as vantagens em utilizar a SM, em estudos de solos, são o seu baixo custo, por ser um método relativamente sensível, seguro e rápido comparado com outras técnicas,

podendo ser realizado tanto em campo quanto em laboratório. Assim, o objetivo deste trabalho foi utilizar a suscetibilidade magnética (SM) para prever atributos do solo e da planta cítrica de forma a facilitar a identificação de áreas específicas de manejo para a cultura da laranja.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização da área e amostragem

A área de estudo localiza-se no município de Gavião Peixoto - SP, com coordenadas médias de  $21^{\circ} 75' S$  e  $48^{\circ} 46' W$  (Figura 1). O clima é denominado mesotérmico de inverno, com temperaturas entre  $22^{\circ}C$  e  $18^{\circ}C$ . O solo é classificado como Latossolo vermelho escuro distrófico, A Moderado, textura média, e encontra-se sob o cultivo de laranja da variedade pêra-rio sobre limão cravo há 14 anos. A área foi dividida em duas formas do relevo de acordo com Troeh (1965), côncavo (48,41 ha) e linear (45,17 ha).



**Figura 1** - Localização da área de estudo e croqui de amostragem. C- côncavo; L- linear.

### 2.2 Coleta e avaliação dos atributos do solo e da planta

Com a utilização de um aparelho de DGPS foi realizado o levantamento das cotas altimétricas e estabelecida uma malha de amostragem, com espaçamentos regulares de 50 m perfazendo um total de 312 pontos em uma área de 93,58 hectares. Os atributos do solo foram avaliados na profundidade de 0,00 a 0,20 m.

A estabilidade dos agregados foi determinada segundo Kemper & Chepil (1965). Os resultados foram expressos em percentual dos agregados nos seguintes diâmetros: maior do que 2 mm e diâmetro entre 1 mm e 2 mm. O diâmetro médio geométrico (DMG) foi expresso em milímetros. O teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) foi determinado segundo a metodologia proposta por Day (1965). A granulometria foi determinada de acordo com a Lei de Stokes, pelo método da pipeta com solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa velocidade por 16 horas, seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

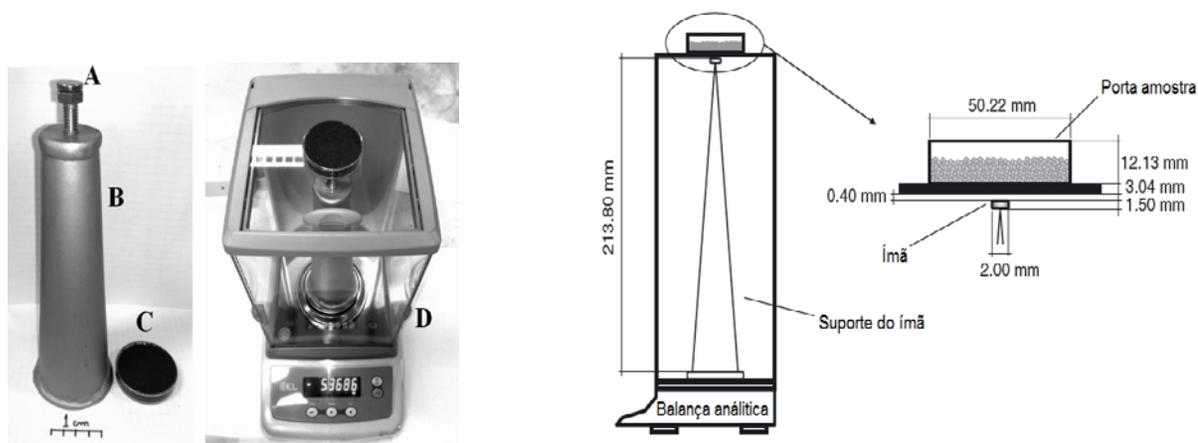
A condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) foi avaliada com o Permeômetro de Guelph empregando-se uma carga hidráulica de 5 cm. A determinação da macroporosidade, microporosidade e volume total de poros (VTP) foram realizados em amostras indeformadas de solo, retirados com anel volumétrico. Estes atributos foram determinados na mesa de tensão e os seus valores expressos em percentagem.

A densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) foi determinada utilizando o método do volume conhecido nos anéis volumétricos (EMBRAPA, 1997). A resistência do solo à penetração (MPa) foi determinada com um penetrômetro de impacto, com ângulo de cone de  $30^\circ$ . O teor de água do solo foi determinado pelo método da pesagem, onde calcula a diferença de peso das amostras com a umidade de campo, e após secas em estufa (EMBRAPA, 1997).

Para análise dos atributos químicos foi utilizado o aparelho DGPS para georreferenciar a planta de laranja mais próxima da interseção da malha construída, o solo foi amostrado na projeção da copa desta planta na profundidade de 0,0-0,20 m.

O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo:  $\text{CaCl}_2$  1N (EMBRAPA, 1997). A determinação dos cátions trocáveis do solo (Ca, Mg e K), matéria orgânica e fósforo disponível foram realizadas pelo método da resina trocadora de íons de acordo com Raij et al. (1987). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a porcentagem de saturação por bases (V%).

A SM, realizada em todas as amostras de solo, foi medida por um sensor da Bartington Instruments (DEARING, 1999) e por uma balança de precisão seguindo a metodologia descrita por Cano et al. (2008) e adaptado por Siqueira (2010b) (Figura 2).



**Figura 2** - Metodologia adaptada de Carneiro et al. (2003) para avaliação da susceptibilidade magnética. A. ímã; B. Suporte; C. Porta amostra; D. Conjunto ímã-suporte-porta amostra e balança (Extraído de Siqueira et al., 2010b).

Os resultados da SM obtido pela balança foram comparados com os resultados medidos pelo sensor da Bartington Instruments com o objetivo de calibrar os dados. Os resultados obtidos pela balança analítica confirmaram a possibilidade do uso de sua técnica para avaliar a SM.

Para análise dos atributos referentes à planta, foram feitas análises da folha e do fruto. Para os cálculos dos teores de nutrientes na folha, utilizou-se uma malha composta por 312 pontos e nas interseções foi estabelecida a unidade amostral de 220,5 m<sup>2</sup>, com base na escolha de nove plantas. A planta central foi georreferenciada. Para análise química do tecido vegetal foram coletadas folhas, conforme Baumgartner et al. (1996). Os macronutrientes e micronutrientes foram analisados conforme metodologia de Bataglia (1983).

Os atributos das frutas foram avaliados em três colheitas: 2002, 2003 e 2007. Para análises dos sólidos solúveis totais (SS), acidez total titulável (AT) e ratio, foram coletados 50 frutos na copa das árvores da unidade amostral, conforme a metodologia proposta por Pozzan et al. (2005). A determinação do (SS) foi feita por refratometria, sendo a leitura expressa em °Brix. A (AT), grama de ácido cítrico/100 ml de suco, foi determinada por titulometria com solução de NaOH 0,3125N.

O ratio, adimensional, foi obtido através da divisão de SS pela AT. Estas determinações foram realizadas conforme a técnica descrita por Horwitz (1960). O atributo ratio, além de indicar a maturidade do fruto é utilizado pela indústria de suco para determinar o ponto de colheita.

Para o atributo produção (PR) (kg unidade amostral<sup>-1</sup>), os frutos foram colhidos em cada unidade amostral e pesados em “big bags”. A caracterização e a avaliação do rendimento em suco (RS) foram

realizadas pela relação do volume de caixas de laranjas necessário para a produção de uma tonelada de suco concentrado (65°Brix).

### 2.3. Análises estatísticas e componentes principais (PCA)

Os dados foram submetidos à análise estatística para a determinação do coeficiente de correlação Pearson (r) entre cada par de variáveis, medindo o grau de relação linear.

Para a realização das análises dos PCA foram divididos em 4 grupos (atributos do solo: físicos e químicos; e atributos da planta: folha e fruto) (Tabela 1).

**Tabela 1** - Conjunto de atributos que compõe os PCs de cada grupo

Atributos Físicos	Atributos Químicos	Atributos da Folha	Atributos do Fruto (2002, 2003 e 2005)
Teor de argila	P	N	Sólidos solúveis
Silte	M.O.	P	Ratio
Areia grossa	pH	K	Produção
Areia média	K	Ca	Rendimento
Areia fina	Ca	Mg	-
% >2mm	Mg	S	-
% 1-2mm	H+Al	B	-
DMG	-	Cu	-
Densidade	-	Fe	-
Macroporos	-	Mn	-
Microporos	-	Zn	-
Resistência do solo á penetração	-	-	-
Teor de água	-	-	-
Condutividade Hidráulica	-	-	-

% >2mm Classe de agregados com diâmetro superior à 2mm; % 1-2mm – Classe de agregados com diâmetro entre 1mm e 2mm; DMG – diâmetro médio do agregado

A análise dos componentes principais-PCA foi utilizada com o intuito de sumarizar o número de atributos estudados (COOLEY et al., 1971; JOHNSON & WICHERN, 2002). Assim, se a maior parte da variância dos dados pode ser atribuída ao 1º, 2º ou ao 3º componente principal (PCA), então esses podem “substituir” as observações originais sem perda de informação (JOHNSON & WICHERN, 2002).

Os componentes principais foram escolhidos com base na porcentagem de variância acumulada e autovalor. Foram escolhidos os CPs com variância acumulada próximo de 70% e autovalor superior a um.

## 2.4. Análise geoestatística

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se o variograma, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os variogramas foram construídos com o auxílio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998), e os modelos experimentais ajustados aos modelos matemáticos. A partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial de cada atributo estudado. Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas dos atributos estudados através do programa Surfer (1999).

Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido e valor do  $r^2$  para o modelo ajustado e validação cruzada (BURROUGH & MCDONNELL 2000; WOLLENHAUPT et al., 1997).

Para investigar a similaridade da distribuição espacial dos atributos, foi feita a correlação espacial dos mapas da suscetibilidade magnética com os atributos do solo e da planta utilizando o critério empregado por Roque et al. (2008).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 é apresentada a caracterização de todos os atributos do solo e da planta utilizados para o estudo, assim como os valores de média e coeficiente de variação dos mesmos.

Na Tabela 3, são apresentadas as respectivas porcentagens de variação total explicada pela componente principal (PC). Segundo Carvalho et al. (2004), basta escolher os primeiros componentes que acumulam uma porcentagem de variâncias explicada igual ou superior a 70%. Nota-se que os três primeiros PCs conseguem representar todos os atributos estudados. Analisando a Tabela 3, observa-se que o PC1 explica 29,74% dos atributos físicos do solo, 52,15 % dos atributos químicos do solo, 24,98% dos atributos da folha e de 68 a 72% os atributos da fruta. Siqueira (2010), em estudos encontrou valores onde a CP1 explica 41,92% da variância dos atributos do solo estudado, já Carvalho Junior et al. (2008) trabalhando com análise multivariada de atributos físicos e químicos do solo encontraram que a CP1 explica 28,29 % da variância dos atributos.

Ressalta-se o total acumulado dos PCs quando este representa os frutos, onde é possível observar que com apenas os dois primeiros fatores a variâncias dos atributos do fruto é explicada quase pela sua totalidade.

**Tabela 2** - Estatística de média e coeficiente de variação para os atributos do solo na profundidade de 0,00-0,20 m, e da planta

ATRIBUTOS DO SOLO			ATRIBUTOS DA PLANTA		
Atributo	Média	Cf.var.	Atributo	Média	Cf.var.
S.M. ( m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	307x10 <sup>-5</sup>	37,34	S.S. (2002)	11,922	6,82
M.O. (g dm <sup>-3</sup> )	17,282	18,26	Ratio (2002)	15	7,30
% >2mm	84,262	15,84	Prod (2002)	1126,4	2,56
% 1-2mm	3,317	104,04	Rend (2002)	233,76	8,71
DMG (mm)	4,019	27,10	S.S (2003)	11,707	5,29
Cond.hidr. (mm)	6,657	98,39	Ratio (2003)	18,121	7,38
Macroporos (%)	25,351	25,96	Prod (2003)	1305,9	15,94
Microporos (%)	22,474	23,52	Rend (2003)	264,31	8,65
VTP (%)	47,823	9,72	S.S. (2007)	10,899	5,05
DS (g cm <sup>-3</sup> )	1,401	7,30	Ratio (2007)	10,160	7,58
Resistência (mpa)	4,264	23,90	Rend (2007)	196,83	6,03
Teor de água (%)	10,101	19,50	Prod (2007)	1347,2	12,5
Teor de argila(g kg <sup>-1</sup> )	253	11,12	N ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	23,899	3,83
A.T. ( g kg <sup>-1</sup> )	697	7,27	P ( mg dm <sup>-3</sup> )	1,0212	5,77
A.G. ( g kg <sup>-1</sup> )	616	44,33	K ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	11,837	13,34
A.M. ( g kg <sup>-1</sup> )	224	21,19	Ca ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	32,320	8,65
A.F. ( g kg <sup>-1</sup> )	346	17,38	Mg ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	2,4808	11,33
Silte ( g kg <sup>-1</sup> )	50	86,24	S ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	2,7606	6,75
P ( mg dm <sup>-3</sup> )	78,26	44,57	B ( mg dm <sup>-3</sup> )	88,375	11,35
pH	4,868	7,88	Cu ( mg dm <sup>-3</sup> )	50,490	37,06
K ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	1,918	29,06	Fe ( mg dm <sup>-3</sup> )	157,480	56,39
Ca ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	18,471	44,70	Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	55,016	17,52
Mg ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	7,692	61,91	Zn ( mg dm <sup>-3</sup> )	55,776	25,60
H+Al ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	31,490	34,06			
SB ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	28,128	44,89			
CTC ( mmolc dm <sup>-3</sup> )	59,619	20,62			
V %	46,635	32,45			

AT= Areia Total; AG= Areia Grossa; AM= Areia Média; AF= Areia Fina; DMG= Diâmetro Médio Geométrico; Agr. > 2 mm= Classe de Agregados maior que 2 milímetros; Agr. 1\_2mm= Classe de Agregados entre 1 e 2 milímetros; Agr. < 1 mm= Classe de Agregados menor que 1 milímetro; DS= Densidade do Solo; VTP= Volume Total de Poros; SB= Soma de Bases; V%= Saturação por Bases; M.O.= Matéria Orgânica; CTC= Capacidade de Troca Catiônica; SM= Susceptibilidade Magnética; SS= Sólidos Solúveis; PROD= Produção de Laranja; REND= Rendimento.

Com o objetivo de verificar a dependência espacial dos atributos estudados foram criados variogramas para a SM e para os atributos referentes ao solo e a planta. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros dos variogramas.

Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial. Os modelos exponenciais e esféricos foram os que melhores se ajustaram à estrutura da variabilidade espacial dos dados. Mcbratney & Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do variograma para os atributos do solo, os quais relataram

que os modelos esféricos e exponenciais são os mais encontrados. Vários pesquisadores (CAMBARDELLA et al., 1994) encontraram o modelo matemático esférico como o mais adaptado para descrever o comportamento de atributos de plantas e de solos.

**Tabela 3** - Dados das componentes principais referentes aos atributos do solo e da planta, na profundidade de 0,0-0,20m

Atributos	PC1		PC2		PC3		Total acumulado
	Variância (%)	Autovalor	Variância (%)	Autovalor	Variância (%)	Autovalor	
Físicos <sup>1</sup>	29,74	3,57	22,93	2,75	16,89	2,03	69,56
Químicos <sup>2</sup>	52,15	3,65	22,07	1,54	13,06	0,91	87,28
Folhas <sup>3</sup>	24,98	2,75	20,35	2,24	11,86	1,30	57,20
Fruto <sup>4</sup> 2002	72,98	2,92	23,93	0,96	2,62	0,1	99,53
Fruto 2003	68,65	2,75	23,59	0,94	7,64	0,31	99,89
Fruto 2007	68,97	2,76	21,90	0,84	6,41	0,26	97,29

<sup>1</sup>= Argila (g kg), M.O. (g dm<sup>-3</sup>), DMG (mm), Condutividade hidráulica (mm h), Macroporos(%), Microporos (%), VTP, Densidade (g cm<sup>-3</sup>), Resistência do solo à penetração (Mpa), Umidade (%); areia grossa (g kg<sup>-1</sup>); areia média (g kg<sup>-1</sup>); areia fina (g kg<sup>-1</sup>); silte (g kg<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> P, M.O, ph, K, Ca, Mg, H+Al; <sup>3</sup> N, P,K,Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn; <sup>4</sup> Sólidos Solúveis, Rácio, Rendimento e Produção.

Ressalta-se que a SM também foi ajustada no modelo esférico concordando com os estudos de Marques Jr (2009). Segundo Siqueira (2010), isto indica que os limites reais de campo podem ser expressos com melhor acurácia quando identificados pela SM. Esta premissa é justificada pelo fato do modelo exponencial, por exemplo, não representar valores reais de campo com grande precisão, já que o patamar para este modelo ocorre teoricamente. Já o alcance encontrado pelo modelo esférico é um valor real. O modelo esférico é associado à representação da continuidade espacial de atributos que tenham transições abruptas, logo mais fáceis de serem identificadas no campo (BURGESS e WEBSTER, 1980; BURGESS et al., 1981). As distribuições de atributos que sejam representados pelo modelo exponencial ou gaussiano, possuem uma transição mais sutil, logo a identificação dos limites de transição entre as classes no campo torna-se mais difícil. O alcance médio para os atributos do solo representados pelo PC1 e PC2 dos atributos físicos e pelo PC1 dos atributos químicos foi de 564 m. Observa-se que estes estão próximos do alcance da SM do solo (506 m), isso indica que o padrão de variabilidade da SM é semelhante ao dos atributos do solo. Isto reforça a ideia do uso eficiente da SM para auxiliar nos levantamentos taxonômicos e técnicos. Marques Jr (2009) e Siqueira (2010) também encontraram valores semelhantes de alcance de variogramas dos atributos físicos e químicos do solo e da SM. Um dos entraves dos mapeamentos de nível detalhado (1:10.000) e ultra-detalhado ( $\geq 1:5.000$ ) é o número de amostras. Atualmente é discutida a estrutu-

ração do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos até o quinto nível e sexto nível, família e série respectivamente, baseando-se em subdivisões dos subgrupos (incluindo detalhes não considerados anteriormente referentes a classes texturais, saturação por bases, mineralogia da fração areia etc.). Entendendo que uma série de solos só poderá ser oficialmente reconhecida depois de ter uma área mínima mapeada, serão necessárias novas técnicas para auxiliar os mapeamentos tornando-os operacionais em um nível de detalhe que seja condizente com o futuro nível de série.

**Tabela 4** - Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados

Atributos	Mod.	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	a (m)	GDE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Valid. Cruzada	LAG		
								1 50m	2 100m	3 150m
Fis. PC1 <sup>a</sup>	Exp	1,515	2,88	547	52,6	0,97	0,901	1021	2819	3830
Fis. PC2 <sup>b</sup>	Esf	0,062	0,14	533	45,2	0,952	0,93	213	655	930
Qui. PC1 <sup>c</sup>	Exp	1,651	2,79	614,6	59,1	0,893	0,873	529	1807	2229
Folh PC3 <sup>d</sup>	Esf	0,401	1,27	346,3	32,5	0,989	1,009	461	1525	2262
Ft02 PC2 <sup>e</sup>	Exp	0,1	0,35	195	28,5	0,84	0,953	43	827	1383
Ft07 PC1 <sup>f</sup>	Exp	0,987	1,67	261,5	59,1	0,695	0,929	604	1595	2725
Ft07 PC2 <sup>g</sup>	Esf	0,2	0,44	90	44,9	0,17	0,007	75	763	1084
SM	Esf	0,004	0,02	506	28,5	0,983	1,117	535	1799	2213

<sup>a</sup> primeira componente principal dos atributos físicos; <sup>b</sup> segunda componente principal dos atributos físicos; <sup>c</sup> primeira componente principal dos atributos químicos; <sup>d</sup> terceira componente principal dos atributos da folha; <sup>e</sup> segunda componente principal dos atributos do fruto safra 2002; <sup>f</sup> primeira componente principal dos atributos do fruto safra 2007; <sup>g</sup> segunda componente principal dos atributos do fruto safra 2007; Mod = Modelo; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> = patamar; a= Alcance; GDE (C<sub>0</sub>/C<sub>0</sub> + C \*100) = grau de dependência espacial; LAG= Número de pares encontrados para as primeiras distâncias do variograma experimental ajustado.

No presente estudo foi encontrado grau de dependência espacial moderado para todos os PCs dos atributos do solo, da planta e para SM. Segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994) quando a relação for menor ou igual a 25%, a dependência espacial é considerada forte; entre 25 e 75% moderado, e maior que 75% fraca.

Outro parâmetro a ser considerado foi o numero de pares de pontos presentes nos “lags” de amostragem (distância entre pares), em especial nos primeiros. Quanto maior a distância (h), em geral, menor a continuidade espacial dos atributos. Os métodos analíticos, tais como o dos quadrados mínimos, não levam em conta o número de pares com que foi avaliado cada ponto do variograma experimental, além de dar o mesmo “peso” para todos os pontos experimentais. Isso pode causar distorções na curva teórica. Um bom modelo deve-se ajustar com maior precisão aos primeiros pares de pontos experimentais. Como pode ser observado na Tabela 4, em todos os modelos ajustados, o número de pares usados na estimativa da semivariância experimental, foi superior ao que a literatura preconiza. Wollenhaupt et al (1997) afirma que deve utilizar o mínimo de 30 pares. Siqueira et al. (2010b) trabalhando com a variabilidade espacial

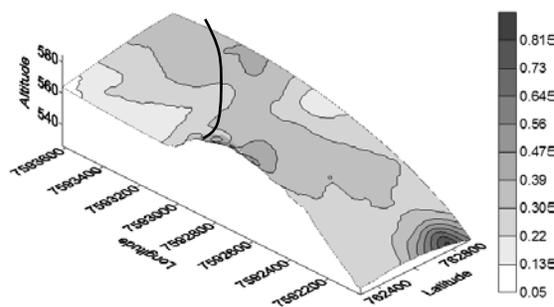
de índices de solo e frutas cítricas obtidas pela análise multivariada trabalharam com um mínimo de 50 pares. Webster e Oliver (1992) recomendam cerca de 100-150 pares.

Para visualizar a distribuição espacial dos atributos estudados, foram construídos os mapas dos atributos da planta e da SM (Figura 3). O uso conjunto dos PCs e da geoestatística permitiu a locação de “índices” que podem expressar a qualidade física do solo, fertilidade do solo, nutrição vegetal e potencial quali-quantitativo da fruta cítrica.

Observa-se no mapa da SM (Figura 3) que seus menores valores ocorreram na posição topo da vertente, forma côncava, enquanto os atributos da folha, apresentam maiores valores nessa mesma forma do relevo. O mesmo ocorreu com a distribuição espacial dos atributos do fruto 07 PC1 e com os atributos físicos PC2, onde os maiores valores encontram-se na forma côncava. Estes resultados exemplificam o grau de correlação negativa encontrado entre a SM com os atributos da folha, e com os atributos do fruto no ano de 2007 (Tabela 5). Regiões com menores teores de SM (topo da vertente) indicam apresentar áreas com maiores potenciais produtivos, visto que estas áreas tendem apresentarem plantas com maiores teores de nutrientes em suas folhas. Assim pode ser estabelecido um vínculo entre as formas de relevo, qualidade da laranja e distribuição da SM.

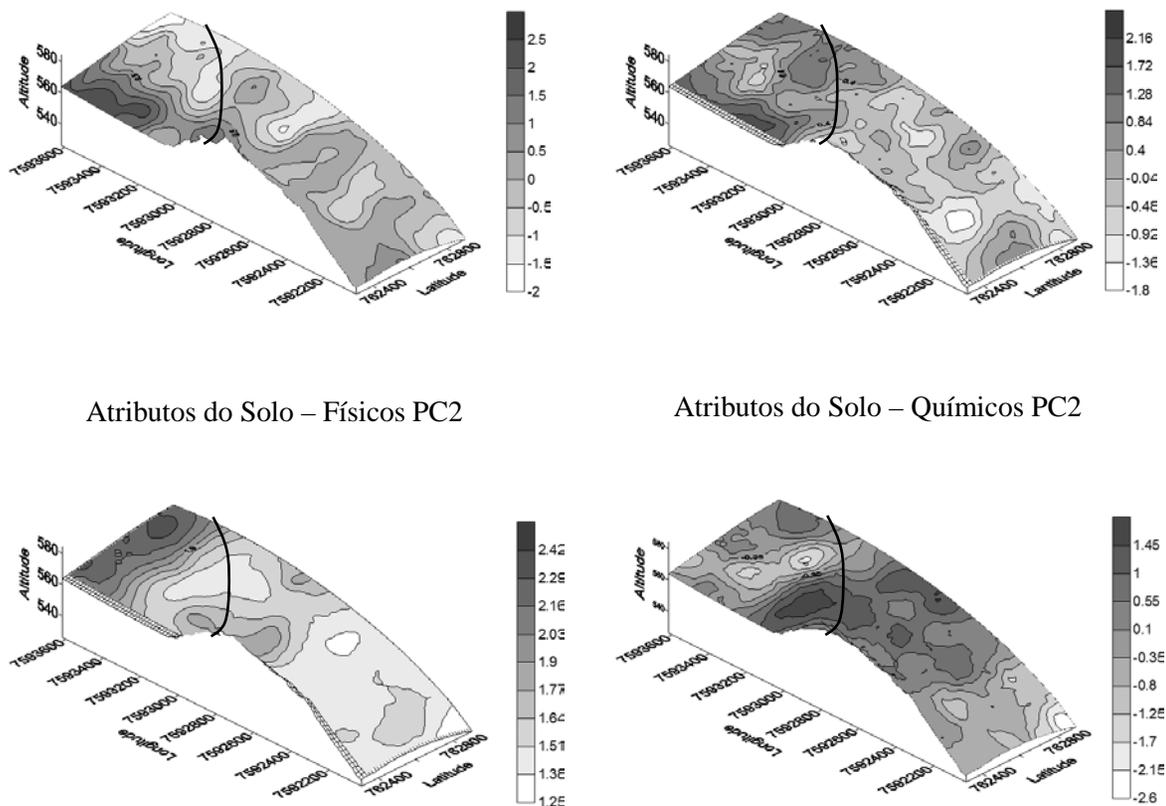
Leão (2004) estudando a variabilidade dos atributos do solo com a produção de laranja pera em Latossolo encontrou dependência espacial para todos os atributos estudados. Os mapas de isolinhas nos dois anos de colheita, apesar das diferentes condições de florada, demonstram que há dependência da qualidade dos frutos em relação às formas da paisagem. Cremonini (2002) e Kravchenko et al. (1999) afirmaram que as variáveis de produção estão correlacionadas com a altimetria do terreno, como depressões, declives, bacias de retenção de água e morros.

Susceptibilidade magnética ( $m^3/kg$ )



Atributos da Planta – Folha PC3

Atributos da Planta – Fruto 07 PC1



**Figura 3** - Mapas de distribuição espacial da SM, dos atributos do solo, da folha e do fruto.

A Tabela 5 apresenta a correlação entre a SM com os PCs dos atributos do solo e da planta. Os valores possibilitam inferências sobre a capacidade da SM em caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo e da planta para definição de áreas homogêneas. Observa-se a existência de correlações positivas e negativas com os atributos físicos do solo e do fruto no ano de 2007. Uma explicação plausível para essa ocorrência é entender que a componente principal (PC) representa apenas um índice composto com todos os atributos estudados, assim, cada atributo pode se relacionar com maior ou menor intensidade com o PC geral desse conjunto.

Como pode ser observado na Tabela 5, a SM apresentou correlação com todos os atributos estudados. Estes resultados indicam o potencial da SM para ser utilizado em trabalhos futuros na identificação e mapeamento de áreas homogêneas.

**Tabela 5** - Correlação entre a susceptibilidade magnética com os PCs referentes aos atributos do solo e da planta, na profundidade de 0,0-0,20m

Solo		Planta	
Físicos <sup>1</sup> PC1	0,105**	Folhas <sup>3</sup> PC3	-0,393**
Físicos <sup>1</sup> PC2	-0,161**	Frutos <sup>4</sup> 2002 PC2	0,121**
Químicos <sup>2</sup> PC1	-0,188**	Frutos <sup>4</sup> 2007 PC1	-0,206**
		Frutos <sup>4</sup> 2007 PC2	0,256**

<sup>1</sup>= Argila (g kg), M.O. (g dm<sup>-3</sup>), DMG (mm), COND. HIDR. (mm h), MACROPOROS(%), MICROPOROS (%), VTP, DENSIDADE (g cm<sup>-3</sup>), RESISTÊNCIA (Mpa), UMIDADE (%); <sup>2</sup> P, M.O, pH, K, Ca, Mg, H+Al; <sup>3</sup> N, P,K,Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn; <sup>4</sup> Sólidos Solúveis, Rácio, Rendimento e Produção. \*\* Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t-student.

Ressalta-se que os resultados observados para a SM estão inseridos em uma região dominada por sedimentos de arenitos da formação Adamantina, Grupo Bauru. Fabris et al. (1998) e Fontes et al. (2000) mostraram a variação da SM em função de diferentes materiais de origem, concluindo que seus valores são maiores em solos originados de rochas basálticas, em relação às sedimentares.

A Tabela 6 mostra o potencial de produção da forma côncava em relação à linear por unidade de área (ha). A forma côncava apresentou um rendimento em produção (t fruta ha<sup>-1</sup>) de 10.44% superior à forma linear. O lucro da forma côncava foi 1927,88 US\$ ha<sup>-1</sup> superior ao da forma linear. O rendimento em suco concentrado da forma côncava (t suco ha<sup>-1</sup>) foi 32.10% superior ao da forma linear. Isso representa um lucro de 56314.59 US\$ ha<sup>-1</sup>. Assim a informação do conhecimento prévio dos locais de máximo desempenho da cultura, fornece subsídios para uma mudança no sistema de pagamento da fruta em função da qualidade e não só da produção.

**Tabela 6** - Capacidade produtiva e lucratividade das formas do relevo

Atributos da fruta	Pedoforma			
	Côncava		Linear	
	(t ha <sup>-1</sup> )	(US\$ ha <sup>-1</sup> )	(t ha <sup>-1</sup> )	(US\$ ha <sup>-1</sup> )
Fruta	40.74	20,384.96	36.89	1,8457.08
Suco concentrado	104.23	231,699.29	78.90	175,384.70
Polpa citrica <sup>1</sup>	20.06	-	18.16	-
Óleo essencial da casca <sup>2</sup>	0.73	-	0.66	-
D' limonene <sup>3</sup>	0.37	-	0.34	-
Liquido aromático <sup>4</sup>	0.23	-	0.21	-

<sup>1</sup> 49.24% da fruta; <sup>2</sup> 1.79% da fruta; <sup>3</sup> 0.92% da fruta; <sup>4</sup> 0.54% da fruta (Fonte: ABECITRUS, 2008). <sup>2</sup> Preço médio do suco concentrado e congelado na Bolsa de Nova Iorque, 2007 (US\$ t<sup>-1</sup>): 2223. <sup>3</sup> Preço médio da caixa de laranja - fruta posta no portão da indústria, 2007 (US\$ t<sup>-1</sup>): 500.49.

Fonte: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA ESALQ/USP, 2008.

As formas do relevo podem ser utilizadas como ferramentas auxiliares na colheita da laranja, indicando os locais com diferentes pontos de colheita. Isso pode minimizar as perdas na qualidade do suco e propiciar uma maior rentabilidade aos pomares de citros.

#### 4 CONCLUSÕES

A suscetibilidade magnética pode ser utilizada na predição de atributos do solo e da laranja, além de auxiliar na caracterização da variabilidade espacial destes atributos.

As formas do relevo podem auxiliar na identificação de áreas de manejo específico para a laranja indicando os locais da paisagem com diferentes potenciais produtivos.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À FAPESP pela concessão de bolsa de iniciação científica (Processo N°07/04688-6).

#### 6 REFERÊNCIAS

BARBIERI, DIOGO MAZZA ET AL. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Sci. agric.** vol.66, n.6, pp. 819-826, 2009.

BAUMGARTNER, J.G. Diagnose Foliar na Citricultura Brasileira. In: **IV Seminário Internacional de Citros – Nutrição e adubação**. DONADIO, L.C.; BAUMGARTNER, J.G., Campinas: Fundação Cargill, p. 61-76, 1996.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A.B. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.4, p.643-659, 1981.

BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R.A., **Principles of Geographical Information Systems**. 2000.

CAMARGO, L.A., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T., HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. et al. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas. **Cienc. Rural**, vol.38, n.4, pp. 974-980, 2008.

CANO, M.E.; CORDOVA-FRAGA, T.; SOSA, M.; BERNAL-ALVARADO, J.; BAFFA, O. Understanding the magnetic susceptibility measurements by using an analytical scale. **European Journal Of Physics**, v. 29, p. 345-354, 2008.

CARNEIRO, A.A.O.; TOUSO, A.T.; BAFFA, O. Avaliação da suscetibilidade magnética usando uma balança analítica. **Química Nova**, v. 26, p. 952-956, 2003.

CARVALHO JUNIOR, W.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CHAGAS, C.S.YF.F.; ELPÍDIO, I. Análise multivariada de Argissolos da faixa atlântica brasileira. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2081-2090, 2008.

COOLEY, W.W.; LOHNES, P. R. Multivariate data analysis. New York: Wiley, 1971.

CREMONINI, L.C.M. **Acurácia de mapas de altimetria obtidos com DGPS na colheita de cereais**. Piracicaba, 2002. 61p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle - size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, **American Society of Agronomy**, v. 1, p. 545-66, 1965.

DE JONG, E.; PENNOCK, D.J.; NESTOR, P.A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena**, v. 40, p. 291–305, 2000.

DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system**. 2° ed. Chi Publ., Kenilworth, UK, 1999.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, v.127, p.728–734, 1996.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**, 2° ed., pp 212, 1997.

EYRE, J.K.; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of  $\gamma$  Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, **Geophysical Journal International**, v. 117, p. 265–271, 1994.

FABRIS, J.D.; COEY, J.M.D.; MUSSEL, W.N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. **Hyperfine Interactions**, v. 113, p. 249-258, 1998.

FROGBROOK, Z.L.; OLIVER, M.A. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. **Soil Use And Management**, v. 23, p.40-51, 2007.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

HORWITZ, C.O. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chenusts**. 9° ed. Whashington: Board, p. 1015, 1960.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**, 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Madison, **America Society Agronomy**, p. 499-510, 1965.

KRAVCHENKO, A.N.; BULLOCK, D.G. Comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. Madison, **Agronomy Journal**, v. 91, n. 3, p. 393-400, 1999.

LEÃO, M.G.A. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de frutos cítricos**. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

LECOANET, H.; L'EVÊQUE, F.; AMBROSI, J.P. 2001. Magnetic properties of saltmarsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France). **Journal of Applied Geophysics**, v. 48, 67–81, 2001.

LEGROS, J.-P. Mapping of the soil, 411 pp., 2006.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, 1999.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds MAHER, B.A. & THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

McBRATNEY, A; MYNASNY, B; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. Amsterdam, **Geoderma** v.109, p.41-73. 2002.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, v. 37, p. 617-639, 1986.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research**, v. 105, pp. 275-282, 2009.

RESENDE, M.; SANTANA, D.P.; RESENDE, S.B. Suscetibilidade magnética em Latossolos do sudeste e Sul do Brasil. In: **Anais da 3ª Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretações de Aptidão Agrícola**. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS/SECS, cap. 3, p. 233-258, 1988.

ROBERTSON, G. P. **GS<sup>+</sup>**: geostatistics for the environmental sciences – GS<sup>+</sup> user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, p. 152, 1998.

ROQUE, M.W.; MATSURAI, E.E.; SOUZA, Z.M.S; BIZARI, D.R.; SOUZA, A.L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1827-1835, 2008.

SANCHEZ, Rodrigo B.; MARQUES JUNIOR, José; PEREIRA, Gener T. and SOUZA, Zigomar M. de. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. *Rev. bras. eng. agríc. ambient* vol.9, n.4, pp. 489-495, 2005.

SINGER, M.J.; VEROSUB, K.L.; FINE, P.; TENPAS, J. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. **Quaternary International**, v. 34–36, p. 243–248, 1996.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. DE. Predicting the properties of Brazilian Haplustalfs from magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v.26, 425-431, 2010b.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma** v. 155, 55-66, 2010a.

SURFER. Surfer 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers: user's guide. New York: Golden software, p. 619, 1999.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. New York, **Am. J. Sci.** v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

VEROSUB, K.L.; ROBERTS, A.P. Environmental magnetism: past, present and future. Washington, **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. 2, p. 2175–2192, 1995.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Berkeley, **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, v.43, p.177-192, 1992.

WOLLENHAUPT, N.C.; MULLA, D.J.; CRAWFORD, G. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. In: **PIERCE, F. J., SADLER, E. J. The state of site-specific management for agriculture**. Madison, p. 19-53, 1997.