

Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça

Rafael Gonçalves Peluco⁽¹⁾, José Marques Júnior⁽¹⁾, Diego Silva Siqueira⁽¹⁾, Gener Tadeu Pereira⁽¹⁾, Ronny Sobreira Barbosa⁽¹⁾, Daniel de Bortoli Teixeira⁽¹⁾, Cássia Rita Adame⁽¹⁾ e Lucas Aguilar Cortez⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Departamento de Solos e Adubos, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/nº, CEP 14884-900 Jaboticabal, SP. E-mail: rgpeluco@hotmail.com, marques@fcav.unesp.br, diego_silvasiqueira@yahoo.com.br, genertp@fcav.unesp.br, rsbagronomo@gmail.com, daniel.dbt@hotmail.com, cassiaadame@yahoo.com.br, cortez.lucas@ig.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da suscetibilidade magnética do solo para estimar a capacidade de suporte de áreas à aplicação de vinhaça. Foram coletadas 241 amostras de solo, de uma área de 380 ha, nas quais foram determinados os atributos químicos, os teores de argila e a suscetibilidade magnética do solo. Foram calculadas as doses de vinhaça recomendadas para cada amostra. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, e foram desenvolvidos modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética e os outros atributos avaliados. A análise da dependência espacial dos dados foi feita com uso da geoestatística. Foram construídos mapas de krigagem e variogramas cruzados, para averiguar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética e os atributos estudados. Com base no mapa de recomendação de vinhaça, nas classes de solo e nos mapas de krigagem, foram calculadas as doses médias de vinhaça e as capacidades de suporte médias, ponderadas pela área. A suscetibilidade magnética apresenta correlação espacial linear significativa com as doses de vinhaça recomendadas e com a capacidade de suporte do solo à aplicação desse efluente, e pode ser utilizada como componente da função de pedotransferência, na quantificação indireta da capacidade de suporte.

Termos para indexação: geoestatística, mapeamento de solo, pedometria, pedotransferência.

Soil magnetic susceptibility for estimating the support capacity to vinasse application

Abstract – The objective of this work was to evaluate the magnetic susceptibility efficiency for estimating the support capacity of areas for vinasse application. Two hundred forty-one soil samples were collected from a 380-ha area, on which soil chemical properties, clay content, and magnetic susceptibility were determined. Vinasse requirement was calculated for each sample. Data were subjected to descriptive statistical analysis, and regression models were developed between magnetic susceptibility and the other evaluated attributes. The analysis of data spatial dependence was performed using geostatistics. Kriging maps and cross variograms were built in order to investigate the spatial correlation between soil magnetic susceptibility and studied attributes. Based on the map of vinasse requirement, on the soil classes, and on the kriging map, calculations were done for average vinasse dose and average soil support capacity, weighted by the area. Magnetic susceptibility has significant linear spatial correlation with recommended vinasse doses and soil support capacity for the application of this effluent, and it can be used as a pedotransfer function for indirect quantification of soil support capacity.

Index terms: geostatistics, soil mapping, pedometrics, pedotransfer.

Introdução

A cana-de-açúcar é uma eficiente fonte de energia renovável, e sua importância no cenário agrícola tem crescido significativamente nos últimos anos (Silveira et al., 2012). No processo de industrialização da cana-de-açúcar, diversos resíduos são gerados, com destaque para a vinhaça, principal efluente das destilarias, a qual, embora apresente alto poder poluente, também possui alto valor fertilizante (Silva

et al., 2007). Se utilizada de maneira adequada, a vinhaça pode contribuir tanto para o incremento da produtividade do canavial como para a preservação do meio ambiente.

A vinhaça é rica em matéria orgânica, macronutrientes (principalmente potássio) e elementos-traço (Franco et al., 2008). Porém seu uso excessivo pode acarretar desequilíbrio nutricional às plantas e poluição das águas subsuperficiais. Para o cálculo de doses de vinhaça adequadas, deve-se considerar o teor de K da

vinhaça, a CTC e o teor de K do solo. Além disso, as amostras compostas do solo devem ser representativas de uma gleba homogênea de, no máximo, 100 ha (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006). No entanto, tendo-se em conta a variabilidade de nossos solos (Montanari et al., 2005), o conhecimento mais detalhado da distribuição espacial destes atributos pode levar a uma maior racionalização na recomendação deste efluente.

Na avaliação quantitativa de atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas (McBratney et al., 2003). Assim, pesquisadores têm apontado a suscetibilidade magnética (Siqueira et al., 2010a) como um atributo mineralógico importante para a quantificação indireta de propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo. A suscetibilidade magnética é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo e pode ser definida como a medida da facilidade com que um material se magnetiza em presença de um campo magnético (Verosub & Roberts, 1995). Cinco tipos básicos de comportamento magnético podem ser considerados: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Nos minerais diamagnéticos (por exemplo, o quartzo), o número de spins eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de spins eletrônicos na direção oposta. O campo magnético externo não exerce influência sobre os spins nesse caso, mas inverte o movimento orbital dos elétrons. Nos minerais paramagnéticos (por exemplo, a olivina), a presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem, e mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados. Os minerais ferromagnéticos (por exemplo, o ferro e o cobalto) são considerados um caso especial de paramagnetismo. Nesses minerais, os spins permanecem alinhados após a retirada do campo magnético, fazendo com que eles possuam grandes valores de magnetização remanescente. Por fim, os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (Siqueira, 2010). Mathé et al. (2006) mencionam que os minerais magnéticos podem ser considerados como micromarcadores de atributos do solo, e que é possível estabelecer correlações entre a suscetibilidade magnética e os atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo. Dearing et al. (1996) relatam que o uso desse parâmetro é ideal para a

realização de estudos que requerem avaliação de grande quantidade de amostras de solo.

Cortez et al. (2011) utilizaram a suscetibilidade magnética em conjunto com técnicas geoestatísticas e de compartimentalização da paisagem, para identificar locais com diferentes potenciais de produção de laranja. Os autores apontaram que essas técnicas aliadas possibilitam a elaboração de mapas para auxílio no planejamento agrícola e nas tomadas de decisão. Siqueira et al. (2010a) avaliaram o uso da suscetibilidade magnética para estimar atributos de um Argissolo Vermelho-Amarelo, e encontraram correlações significativas dela com o teor de argila, a CTC, a capacidade de adsorção de fósforo e o teor de hematita, e concluíram que a suscetibilidade magnética pode ser utilizada em funções de pedotransferência.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a suscetibilidade magnética do solo para estimar a capacidade de suporte de diferentes áreas à aplicação de vinhaça.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em área comercial da Usina São Martinho, com histórico de mais de dez anos de aplicação de vinhaça, localizada no nordeste do Estado de São Paulo, no Município de Guataparã (21°29'48"S, 48°02'16"W, 557 m de altitude). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, megatérmico, tropical com estação seca de inverno e precipitação média de 1.400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico.

Na área de experimento, verificou-se a presença de solos derivados dos seguintes materiais de origem: basalto, depósito colúvio-eluvionar e depósito aluvionar (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2012). Os solos, cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada, foram classificados (Santos et al., 2006) como: Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.1; LVd3.4); Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1); e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1).

Para a realização das análises granulométricas, químicas, e da suscetibilidade magnética, foram

coletadas 86 amostras de solo à profundidade de 0,00–0,80 m, espaçadas de 30 m, conforme recomendação da norma P4.231 da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006). As amostras foram coletadas em uma transeção de 2.600 m, que seguia o espigão da paisagem, ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, de maneira a se obterem 86 pontos nas diferentes classes de solo, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, no total de 241 pontos, na área experimental de 380 ha.

As amostras foram secas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha, para a determinação do teor de matéria orgânica (MO), de acordo com o método descrito em Claessen (1997), dos atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, K, e H+Al) e da capacidade de troca catiônica (CTC), de acordo com Raij et al. (2001). A granulometria do solo foi determinada de acordo com Claessen (1997), e a avaliação da suscetibilidade magnética foi realizada em laboratório, por um medidor de suscetibilidade MS2, (Bartington Instruments Ltd., Oxford, Inglaterra) acoplado a um sensor de laboratório MS2B de duas frequências, conforme metodologia descrita por Dearing (1999).

De acordo com a fórmula proposta na norma P4.231 (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006), procedeu-se ao cálculo de recomendação de aplicação de vinhaça para cada ponto amostral, a partir dos valores de CTC e de concentração de K no solo, e da concentração média de K na vinhaça ($2,825 \text{ kg m}^{-3}$) de acordo com as medições feitas nas safras 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012.

Para avaliar a capacidade de suporte do solo à aplicação de doses vinhaça, utilizou-se a fórmula proposta pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006) (Fórmula 1), com uso da concentração média de K na vinhaça. Foi considerado o teor de K no solo igual a zero, a fim de se calcular a dose máxima do efluente. Embora os teores de K no solo tenham sido iguais a zero, este teor foi utilizado para isolar o efeito da CTC do solo, e para se ter uma ideia de quanto de K seria necessário para ocupar 5% da CTC, conforme recomendação da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006). Assim, utilizou-se a equação $\text{Dose (m}^3 \text{ ha}^{-1}) = [(0,05\text{CTC} - \text{ks}) \times 3.744 + 185]/\text{kvi}$; em que: CTC é a capacidade de troca catiônica a pH 7,0, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; ks é a concentração de K no solo à profundidade de 0,80 m, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; 3.744 é a constante para

transformar os resultados da análise de fertilidade para quilograma de K num volume de $8\,000 \text{ m}^3$ (1 ha e 0,80 m de profundidade), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; 185 é a massa de K_2O extraído pela cultura, em kg ha^{-1} por corte; kvi é a concentração de K na vinhaça, kg m^{-3} de K_2O .

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, para obtenção de média, mediana, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos, assimetria, curtose e normalidade dos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A partir dos pontos da transeção, foram construídos modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética e os demais atributos do solo, com uso do software Minitab 13.1 (Minitab, State College, PA, EUA). A suscetibilidade magnética foi utilizada para obtenção da função de pedotransferência, de acordo com o modelo de regressão obtido (Figura 1), utilizada para estimar as recomendações de doses de vinhaça e a capacidade de suporte do solo à aplicação dessas doses, para cada ponto amostral.

Com base na carta de solos da área experimental, foram calculados os valores médios dos atributos estudados para cada classe de solo. Em conformidade com a norma da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006), foi construído um mapa com a recomendação de aplicação de vinhaça para glebas de até 100 ha, tendo-se considerado o valor médio das doses de vinhaça, ponderado pela área, obtido a partir das glebas de até 100 ha. Esses valores foram contrastados com os da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, de acordo com os mapas de classes de solo e os mapas de krigagem.

A análise da dependência espacial dos atributos do solo foi feita por meio de geoestatística (Vieira et al., 1983), com uso de variogramas modelados com o programa GS+ (Geostatistics for environmental sciences, Robertson, 1998), e os modelos matemáticos foram ajustados aos variogramas experimentais, 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, por meio do programa Surfer 7.0 (Golden Software, New York, EUA). As correlações espaciais da suscetibilidade magnética com os atributos estudados foram avaliadas por meio de variogramas cruzados. Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, na

presença de patamar claramente definido e no valor do R^2 para o modelo ajustado de validação cruzada.

Resultados e Discussão

A análise do coeficiente de variação (CV) possibilita a comparação quanto à heterogeneidade dos dados (Tabela 1). De acordo com a classificação de Warrick & Nielsen (1980), o teor de MO e a capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça enquadram-se na

classe de heterogeneidade moderada ($12\% < CV < 24\%$), enquanto todos os outros atributos enquadram-se na classe de alta heterogeneidade ($CV \geq 24\%$). Entre os atributos estudados, a suscetibilidade magnética e o teor de argila apresentaram grande amplitude de dados, o que pode estar relacionado à variação dos materiais de origem dos solos encontrados na área do experimento, que está inserida em um divisor litoestratigráfico arenito-basáltico. Fontes et al. (2000), utilizaram um imã em forma de U e uma balança analítica adaptada

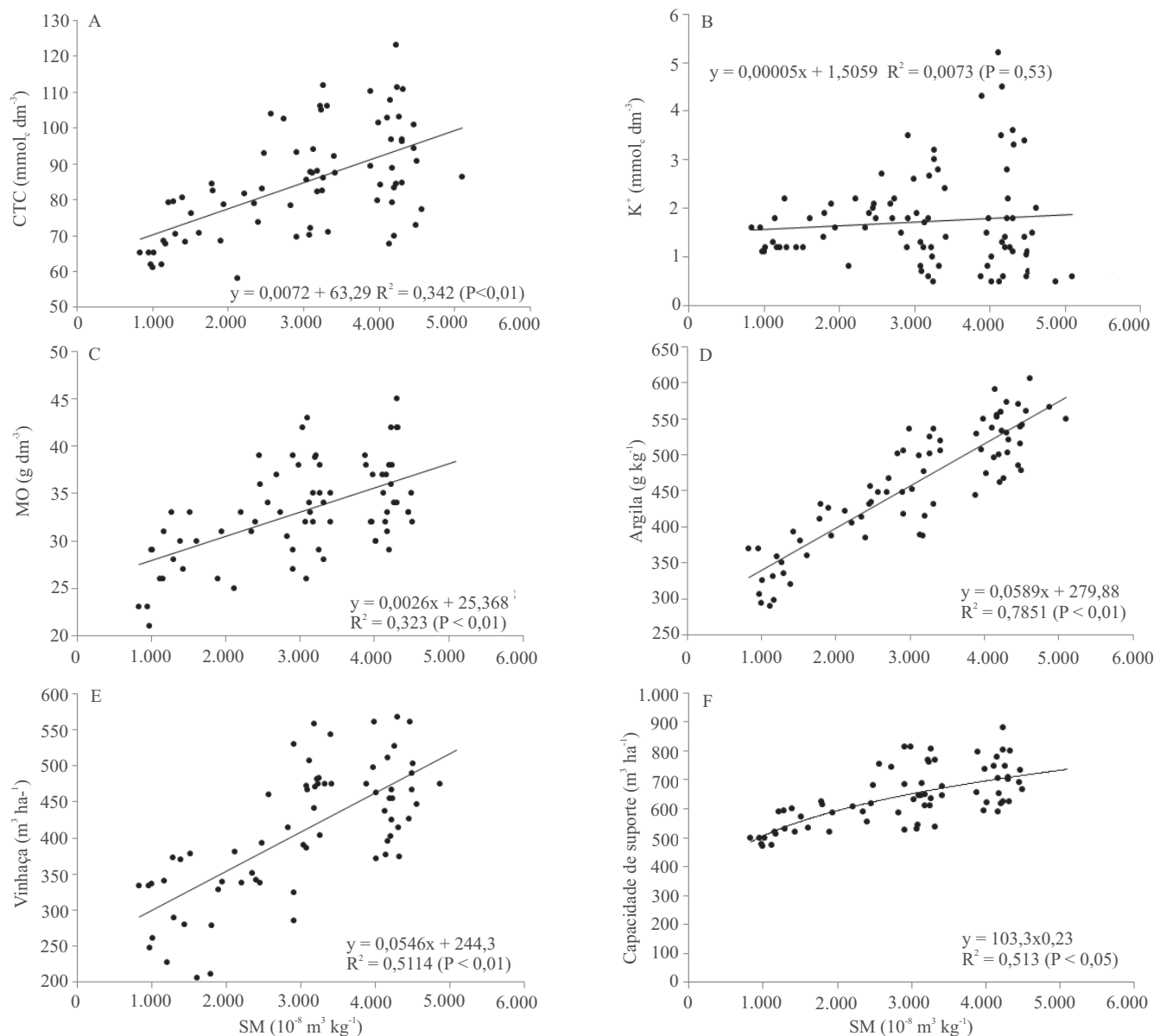


Figura 1. Modelos de regressão entre suscetibilidade magnética e os atributos do solo avaliados. A, Capacidade de troca catiônica; B, potássio; C, matéria orgânica; D, argila; E, doses de vinhaça calculadas pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006); F, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça.

para as medições da suscetibilidade magnética, e demonstraram a variação nesse atributo em função de diferentes materiais de origem.

Foram observados valores semelhantes de média e mediana, para todos os atributos. Com exceção do K, os atributos também apresentaram valores de assimetria e curtose próximos de zero, o que caracteriza distribuições simétricas e possibilita a aplicação das técnicas geoestatísticas. Apenas a MO e as doses recomendadas de vinhaça apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 1). A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, sendo desejável apenas que a distribuição não apresente valores extremos, que poderiam comprometer as análises (Deutsch & Journel, 1998). O fato de o K ter apresentado valores de assimetria e curtose mais distantes de zero, além de um alto valor de CV, pode estar relacionado à dinâmica do nutriente no solo e à variabilidade da textura na área experimental. Werle et al. (2008) trabalharam com Latossolos de textura média e argilosa, e observaram maior capacidade de retenção de K em textura argilosa.

Foram observadas correlações positivas e significativas da suscetibilidade magnética com a CTC, com os teores de argila e de MO, com as recomendações de doses de vinhaça e com a capacidade de suporte do solo à recomendação de vinhaça; no entanto, a suscetibilidade magnética não se correlacionou com o teor de K no solo (Figura 1). Hanesch & Scholger (2005) trabalharam com oito grupos de solos da Áustria, agrupados com base no tipo de solo e no material de origem, e também encontraram correlações significativas positivas da suscetibilidade magnética com os teores de MO e argila.

De acordo com Fontes et al. (2000), solos com maior fração argila favorecem a formação de minerais de

comportamento magnético mais evidente. A presença de MO também favorece o aumento da suscetibilidade magnética, uma vez que proporciona condições favoráveis para a redução do ferro, o que dificulta a transformação de magnetita em hematita, que tem menor expressão magnética nos solos (Santana et al., 2001). Segundo Hanesch et al. (2006), entre outros fatores, a MO favorece a transformação do Fe pedogenético e causa a neoformação de minerais com característica magnética. Portanto, pode-se considerar que a suscetibilidade magnética é covariativa da textura e da MO.

Houve variação dos atributos do solo, conforme as classes de solo, com maiores teores de suscetibilidade magnética nas áreas de solos mais argilosos, oriundos de basalto, com maiores teores de Fe. Essas áreas diferiram estatisticamente das áreas com solos de textura média. Fontes et al. (2000) também observaram que a suscetibilidade magnética varia em razão da classe de solo e do material de origem, e que solos originados de rochas basálticas apresentam maior suscetibilidade magnética.

Os teores de MO e CTC também diferiram estatisticamente entre os solos, e os maiores valores foram observados nos solos argilosos LVef e LVdf. O potássio apresentou valores mais elevados na área de LVef, que diferiu estatisticamente das demais classes de solo (Tabela 2). A capacidade de suporte, estimada segundo a resolução da Cetesb, diferiu significativamente entre as classes de solos, em que os solos férricos (LVef e LVdf), que têm maior teor de argila, MO, CTC, e SM, apresentaram os maiores valores. Quanto às doses recomendadas de vinhaça, os Latossolos férricos diferiram significativamente dos Latossolos Vermelhos de textura média que, por sua vez, não diferiram do Latossolo Vermelho-Amarelo

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos atributos do solo, avaliados nos 241 pontos coletados da área de 380 ha.

Atributo	Média	Mediana	CV (%)	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose	p
Argila (g kg ⁻¹)	425,41	454,50	28,88	83,00	619,50	-0,61	-0,48	<0,01
MO (g dm ⁻³)	30,41	30,00	20,46	16,00	50,00	0,13	-0,10	>0,15
K ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	1,82	1,50	60,98	0,30	8,00	1,75	4,58	<0,01
CTC (mmol _c dm ⁻³)	77,18	73,70	25,12	37,40	152,60	0,76	0,71	<0,01
Vinhaça (m ³ ha ⁻¹) ⁽¹⁾	344,40	352,34	37,36	61,21	702,21	0,04	-0,44	>0,15
CS (m ³ ha ⁻¹)	577,53	554,53	22,18	313,32	1076,70	0,76	0,72	<0,01
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	3015,00	3200,00	54,06	168,00	7458,00	0,03	-0,82	<0,01

⁽¹⁾Doses calculadas pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006). CS, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; CTC, capacidade de troca catiônica; K⁺, teor de potássio; MO, matéria orgânica; SM, suscetibilidade magnética; p, significância do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

(Tabela 2). Este último, apesar de ter apresentado menor capacidade de suporte, foi o solo para o qual as maiores doses de vinhaça foram recomendadas, em razão de seu baixo teor de K.

O mapa de doses recomendadas para aplicação de vinhaça, conforme a metodologia amostral da Cetesb, considera que um ponto é representativo de uma gleba homogênea de até 100 ha (Figura 2). A dose média de vinhaça recomendada pelo método convencional (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006), ponderada pela área, foi de 548 m³ ha⁻¹, 39% superior à dose recomendada de acordo com as classes de solo (333 m³ ha⁻¹), e 27% superior às doses recomendadas com o uso da suscetibilidade magnética (400 m³ ha⁻¹) (Tabela 2). Quando comparada com as médias da capacidade de suporte (567 m³ ha⁻¹) e da capacidade de suporte estimada (615 m³ ha⁻¹), a dose média calculada a partir dos resultados de densidade de amostragem do solo convencional mostrou-se muito próxima. Esses resultados indicam que a recomendação de doses de vinhaça conforme as classes de solo aumentaria a racionalidade das recomendações. Porém, segundo Montanari et al. (2005), há variabilidade dentro das classes de solo.

Todos os atributos avaliados apresentaram dependência espacial, e os modelos esférico, exponencial e gaussiano foram os que apresentaram melhor ajuste à estrutura da variabilidade espacial dos dados (Tabela 3). ACTC, as doses estimadas de vinhaça, a capacidade de suporte, a capacidade de suporte estimada e a suscetibilidade magnética foram ajustadas ao modelo esférico. Cortez et al. (2011) trabalharam com técnicas geoestatísticas e compartimentalização da paisagem, para delimitações de zonas específicas de

manejo na citricultura, e também encontraram ajustes dos variogramas da suscetibilidade magnética ao modelo esférico. Observou-se que, para argila, doses recomendadas de vinhaça, doses estimadas, capacidade de suporte e capacidade de suporte estimada, os valores de alcance do semivariograma foram próximos aos observados para suscetibilidade magnética do solo. Cortez et al. (2011) também encontraram valores semelhantes de alcance entre os variogramas dos atributos físicos e químicos de um Latossolo e o da suscetibilidade magnética.

A análise da relação $C_0/(C_0 + C_1)$ para a argila, CTC, doses de vinhaça estimada, capacidade de suporte, capacidade de suporte estimada e suscetibilidade magnética mostrou que esses atributos apresentam forte grau de dependência espacial, enquanto as doses de vinhaça, o K e a MO apresentaram dependência espacial moderada (Tabela 3). De acordo com 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%, média, e maior que 75%, fraca.

Para verificar a variabilidade dos atributos e a existência de correlação espacial, foram construídos mapas de krigagem (Figura 3 e 4) e variogramas cruzados dos atributos estudados, em função da suscetibilidade magnética do solo (Figura 5). Os mapas dos atributos do solo apresentam padrão semelhante ao mapa de classes de solos e ao mapa de relevo (Figura 3). Isso pode ser confirmado pelo sentido das isolinhas das classes de variabilidade. Leão et al. (2010, 2011) relatam que a avaliação do sentido das isolinhas das classes de variabilidade pode auxiliar na compreensão da relação solo-paisagem e, por

Tabela 2. Médias dos atributos avaliados por classes de solo⁽¹⁾.

Classe de solo ⁽²⁾	Área (ha)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	MO (g dm ⁻³)	CTC ----- (mmol _c dm ⁻³) -----	K ⁺	Vinhaça	Vinhaça estimada	CS	CS estimada
							----- (m ³ ha ⁻¹) -----			
LVA3.1	7	952cd	315b	26bc	62bc	1,2b	336ab	296cd	476bc	496c
LV3.1	126	1.728c	361b	28b	69b	1,7b	291b	339c	519b	557b
LV3.4	47	633d	207c	22c	55c	1,5b	250b	279d	431c	444c
LVdf1.1	107	3.841b	477a	33a	84a	1,8b	389a	454b	621a	685a
LVef1.1	93	4.510a	512a	33a	88a	2,4a	369a	491a	645a	709a
Média	380	2.854	411	30	76	2	333	400	567	615

⁽¹⁾Médias seguidas por letras iguais, nas colunas, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾LVd, Latossolo Vermelho distrófico; LVef, Latossolo Vermelho eutrófico; LVA, Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVdf, Latossolo Vermelho distroférrico. SM, suscetibilidade magnética; vinhaça, dose de vinhaça calculada pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006); vinhaça estimada, dose recomendada de vinhaça, estimada de acordo com a suscetibilidade magnética (SM); CS, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; CS estimada, capacidade de suporte estimada de acordo com a SM; Média, refere-se à média ponderada pela área.

consequente, das relações de causa e efeito. Segundo Siqueira et al. (2010b), o relevo tem grande influência na variabilidade espacial dos atributos do solo.

Há similaridade da variabilidade espacial entre os mapas de krigagem das doses recomendadas de vinhaça, obtidos pelo cálculo da Cetesb (Figura 4 A), e os das doses estimada de vinhaça pela suscetibilidade magnética (Figura 4 B), o que também ocorreu entre os mapas de krigagem de capacidade de suporte (Figura 4 C) e os da capacidade de suporte estimada

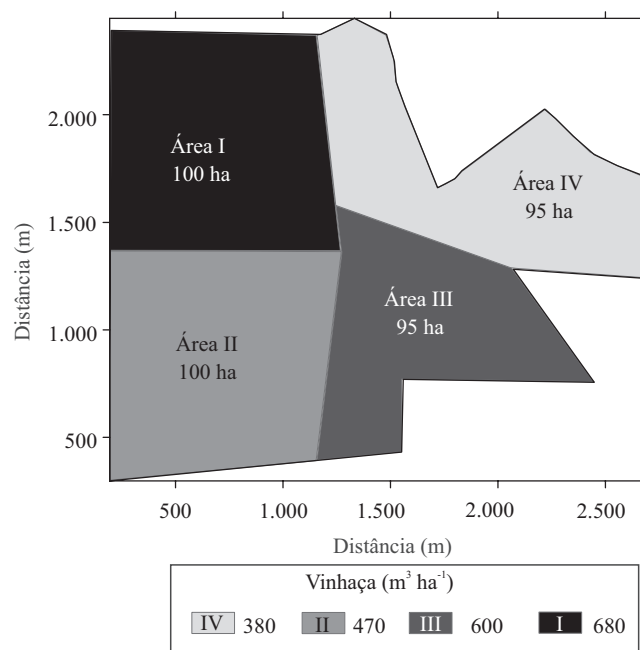


Figura 2. Mapa de recomendação de aplicação de vinhaça, de acordo com o método de amostragem da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006).

(Figura 4 D). Também foram verificados os mesmos padrões de isolinhas nos mapas de CTC (Figura 3 A) e de K (Figura 3 B). Como esses atributos são utilizados no cálculo de determinação das doses de vinhaça (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006), seu comportamento espacial influencia diretamente os mapas de recomendação de doses do efluente.

Nos mapas de krigagem, foram verificados maiores valores de CTC e K nas áreas com maiores teores de argila e MO (Figura 3). Fontes de K nos solos tropicais baseiam-se principalmente na MO e na adubação, uma vez que, em solos tropicais muito intemperizados, os minerais presentes são geralmente pobres nesse elemento (Raij, 2011).

As isolinhas dos mapas de argila e MO também coincidiram com as do mapa da suscetibilidade magnética, nos quais foi possível observar elevação da suscetibilidade magnética com o aumento dos teores de argila e MO. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Siqueira et al. (2010a), que observaram correlações positivas da suscetibilidade magnética com esses dois atributos. Na análise dos mapas, também foi possível constatar que a continuidade espacial da suscetibilidade magnética é similar à continuidade espacial das doses recomendadas de vinhaça e da capacidade suporte do solo. Regiões com maior suscetibilidade magnética coincidiram com áreas com potencial de receber maiores doses de vinhaça (Figura 4).

Todos variogramas cruzados apresentaram correlação espacial definida positiva (Figura 5), o que indica que, com o aumento da suscetibilidade magnética, os valores dos atributos estudados

Tabela 3. Geoestatística dos atributos avaliados do solo.

Parâmetro ⁽¹⁾	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)	$[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$	R^2
Argila ($g\ kg^{-1}$)	Exponencial	7,40	97,40	1.284	7,60	0,977
MO ($g\ dm^{-3}$)	Exponencial	8,90	26,76	435	33,26	0,892
K^+ ($mmol_c\ dm^{-3}$)	Exponencial	0,2980	0,8270	519	36,03	0,952
CTC ($mmol_c\ dm^{-3}$)	Esférico	100,00	434,20	844	23,03	0,963
Vinhaça ($m^3\ ha^{-1}$)	Gaussiano	7.640	17.750	928	43,04	0,987
Vinhaça estimada ($m^3\ ha^{-1}$)	Esférico	446,00	3.079	1.226	14,49	0,965
CS ($m^3\ ha^{-1}$)	Esférico	4.260	18.190	874	23,42	0,982
CS estimada ($m^3\ ha^{-1}$)	Esférico	172,82	4.671,04	870	3,70	0,913
SM ($10^{-8}\ m^3\ kg^{-1}$)	Esférico	140.000	1.171.000	1.136	11,96	0,959

⁽¹⁾MO, teor de matéria orgânica; K^+ , teor de potássio; CTC, capacidade de troca catiônica; vinhaça, dose de vinhaça calculada pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006); vinhaça estimada, dose recomendada de vinhaça, estimada de acordo com a suscetibilidade magnética (SM); CS, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; CS estimada, capacidade estimada de acordo com a SM.

umentam, o que está de acordo com os resultados encontrados nos modelos de regressão (Figura 1). Segundo estes modelos, com exceção do K, houve correlação positiva da suscetibilidade magnética com os atributos estudados. Vale ressaltar a correlação espacial positiva da suscetibilidade magnética com as

doses recomendadas de vinhaça, as doses estimadas, a capacidade de suporte e a capacidade de suporte estimada, o que reforça a ideia de que a suscetibilidade magnética pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar o mapeamento de áreas com diferentes capacidades de suporte à aplicação de vinhaça.

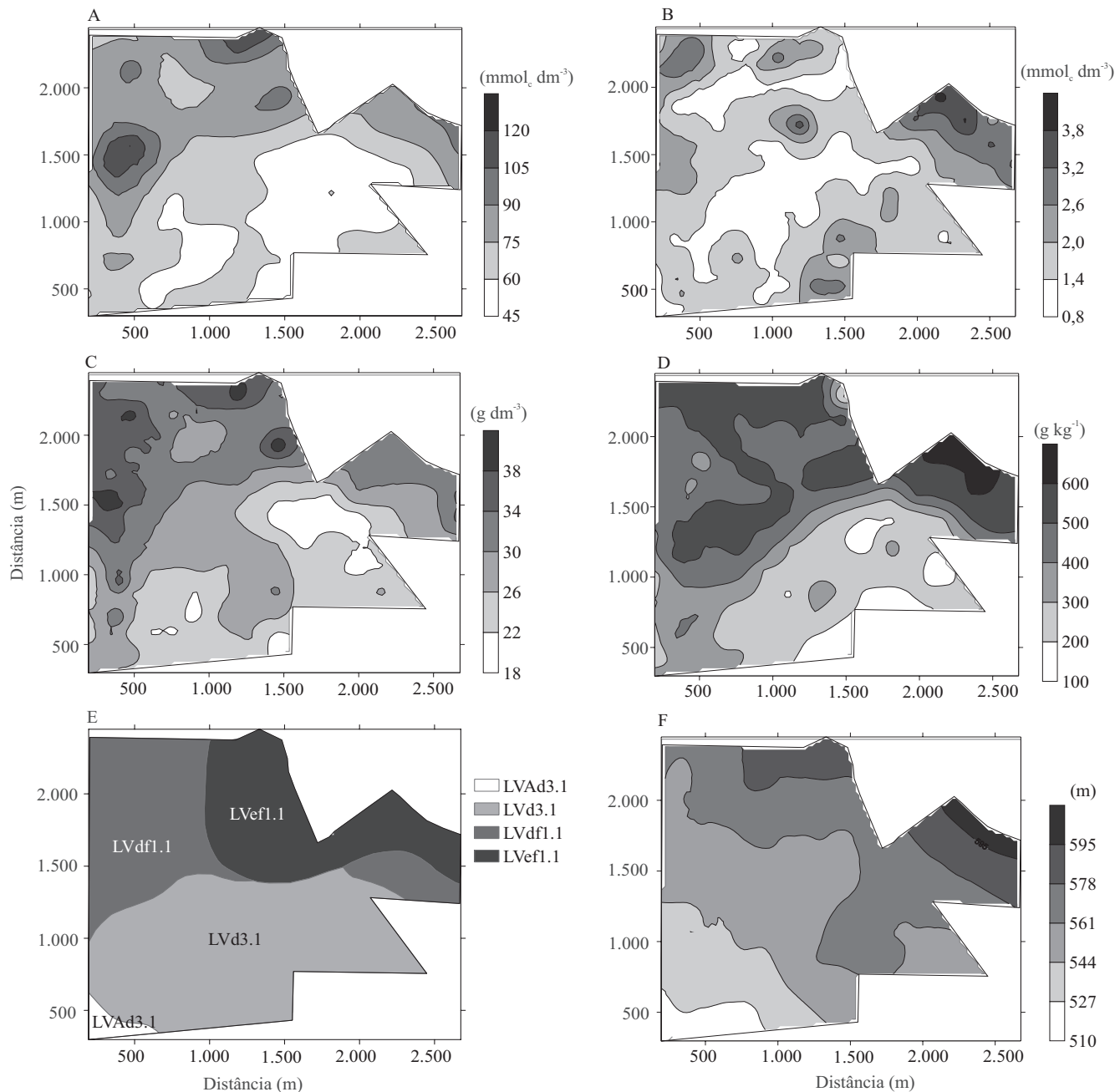


Figura 3. Mapas de krigagem dos atributos do solo, de classes de solo e de representação topográfica. A, capacidade de troca catiônica; B, potássio; C, matéria orgânica; D, argila; E, classe de solos; F, relevo (altitude).

De acordo com os valores médios ponderados pela área, das doses recomendadas de vinhaça (273 m³ ha⁻¹) e das doses estimadas de vinhaça (382 m³ ha⁻¹), calculados para os mapas de krigagem (Figura 4), verificam-se menores doses do que nas comparações

com a recomendação para glebas de até 100 ha, pelo método de amostragem Cetesb (Figura 2), e com a recomendação por classes de solo (Tabela 2), o que mais uma vez indica maior racionalidade na recomendação de vinhaça.

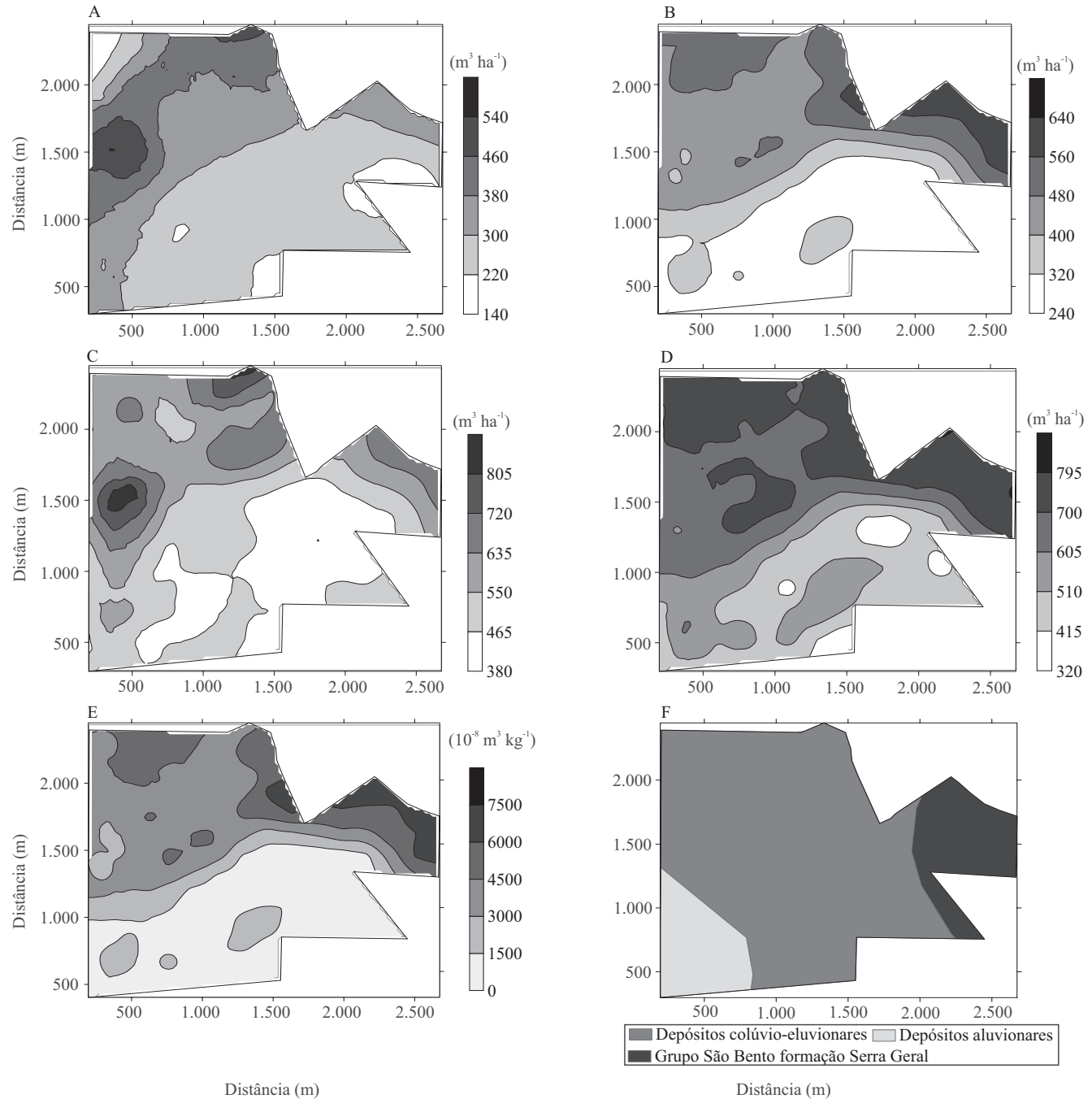


Figura 4. Mapas de krigagem dos atributos do solo e de representação geológica. A, doses de vinhaça, calculadas pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006); B, dose estimada de acordo com a suscetibilidade magnética (SM); C, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; D, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, estimada de acordo com a SM; E, suscetibilidade magnética; F, geologia.

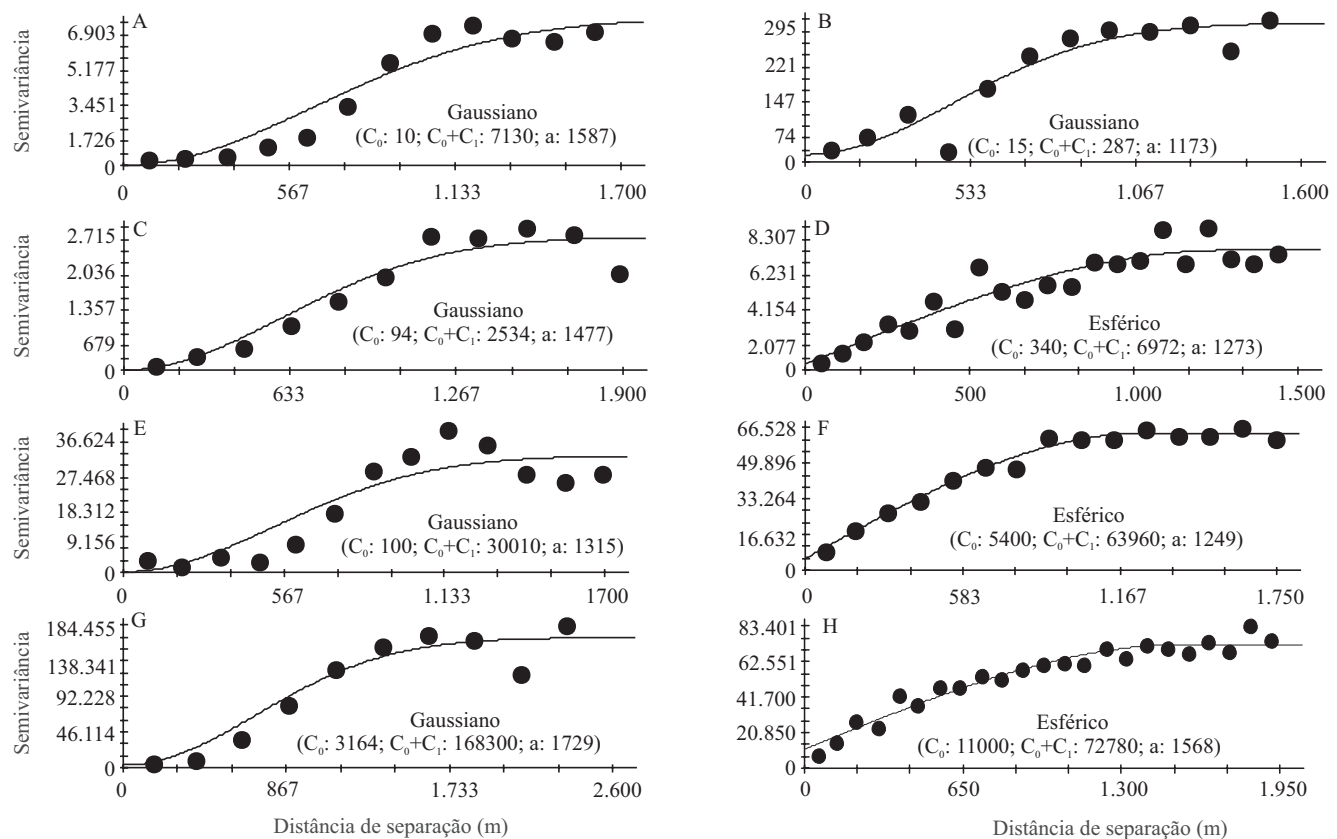


Figura 5. Variogramas cruzados dos atributos do solo, em função da suscetibilidade magnética (SM). A, Capacidade de troca catiônica; B, potássio; C, matéria orgânica; D, argila; E, doses de vinhaça, calculadas pelo método da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2006); F, dose estimada de acordo com a SM; G, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; H, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, estimada de acordo com a SM.

Os valores médios das capacidades de suporte ($495 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e de suporte estimada ($560 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), ponderados pela área dos mapas de krigagem (Figura 4), foram inferiores aos valores de capacidade de suporte obtidos por classes de solo (Tabela 2). Uma vez que os mapas de krigagem representam melhor a variabilidade do solo, pode-se concluir que as chances de superestimação das recomendações de doses de vinhaça, pelo método de amostragem convencional, são maiores do que quando analisados pela comparação com as capacidades de suporte médias, calculadas por classes de solo.

A fórmula do cálculo das doses de vinhaça proposto pela Cetesb é efetiva; porém, a densidade amostral sugerida não consegue captar as variações que ocorrem no campo, o que pode resultar na recomendação de doses equivocadas de vinhaça quanto à capacidade de suporte do solo.

Conclusões

1. A suscetibilidade magnética apresenta correlação espacial linear significativa com as doses recomendadas de vinhaça e com a capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça.
2. A suscetibilidade magnética pode ser utilizada como componente da função de pedotransferência, na quantificação indireta das doses recomendadas e da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo auxílio financeiro; e à Usina São Martinho S/A, pela concessão da área experimental e apoio na realização do experimento.

Referências

- 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**, v.58, p.1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997. 212p. (Embrapa-CNPq. Documentos, 1).
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Geobank**: mapa geológico do Estado de São Paulo – escala 1:750.000. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/Projetos.Projeto.Cadastro?p_cod_projeto=308&p_webmap=N>. Acesso em: 29 dez. 2012.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **P4.231**: vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: Cetesb, 2006.12p.
- CORTEZ, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PELUCO, R.G.; TEIXEIRA, D. Del B.; SIQUEIRA, D.S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na Agricultura**, v.26, p.60-79, 2011.
- DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**: using the Bartington MS2 system. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54p.
- DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.J.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, v.127, p.728-734, 1996. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb04051.x.
- DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. **GSLIB**: geostatistical software library and user's guide. 2nd ed. New York: Oxford University, 1998. 369p.
- FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, T.S. de; COSTA, L.M.; CAMPOS, A.A.G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, v.96, p.81-99, 2000. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00005-7.
- FRANCO, A.; MARQUES, M.O.; MELO, W.J. Sugarcane grown in an Oxisol amended with sewage sludge and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, v.65, p.408-414, 2008. DOI: 10.1590/S0103-90162008000400013.
- HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v.161, p.50-56, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02577.x.
- HANESCH, M.; STANJEK, H.; PETERSEN, N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. **Geophysical Journal International**, v.165, p.53-61, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02933.x.
- LEÃO, M.G.A. de; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M. de; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.643-651, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000400003.
- LEÃO, M.G.A. de; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M. de; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. O relevo na interpretação da variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.1152-1159, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010001100004.
- MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P.E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, v.58, p.202-217, 2006. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.06.004.
- MCBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.L.M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. de. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.69-77, 2005. DOI: 10.1590/S0100-204X2005000100010.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- ROBERTSON, G.P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.
- SANTANA, G.P.; FABRIS, J.D.; GOULART, A.T.; SANTANA, D.P. Magnetite and its transformation to hematite in a soil derived from steatite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.33-42, 2001.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SILVA, M.A.S. da; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.108-114, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000100014.
- SILVEIRA, L.C.I. da; KIST, V.; PAULA, T.O.M. de; BARBOSA, M.H.P.; OLIVEIRA, R.A. de; DAROS, E. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de cana-de-açúcar no Estado de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v.42, p.587-593, 2012. DOI: 10.1590/S0103-84782012000400002.
- SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JUNIOR, J.; MATIAS, S.S.R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with

- magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v.26, p.425-431, 2010a. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x.
- SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p.55-66, 2010b. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.11.024.
- VEROSUB, K.L.; ROBERTS, A.P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p.2175-2192, 1995. DOI: 10.1029/94JB02713.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, p.1-75, 1983.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p.319-344.
- WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2297-2305, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600009.

Recebido em 5 de fevereiro de 2013 e aprovado em 6 de maio de 2013