



## Correlação Espacial da Pressão de Preconsolidação de um LATOSSOLO VERMELHO sob Colheita Mecanizada de Cana-de-Açúcar <sup>(1)</sup>

**Fernando Silva Araújo<sup>(2)</sup>; Zigomar Menezes de Souza<sup>(3)</sup>; Reginaldo Barbosa da Silva<sup>(4)</sup>.**

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos da FAPESP

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto da Universidade Estadual do Piauí, *Campus Alexandre Alves de Oliveira*, Parnaíba-PI. E mail: [fernandoaraujo@uespi.br](mailto:fernandoaraujo@uespi.br); Professor Dr. do Departamento de água e solo, FEAGRI/UNICAMP, Campinas, SP, Brazil; Professor Dr. da Universidade Estadual Paulista(UNESP), Registro, São Paulo, Brazil.

**RESUMO:** A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) pode ser utilizada como uma medida útil do estado mecânico do solo para o seu uso, manejo e planejamento de sistemas de mecanização. Este trabalho por objetivo a avaliação do comportamento compressivo num Latossolo Vermelho distrófico típico álico sob colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar e a caracterização da variabilidade espacial da pressão de preconsolidação estimada por modelos de capacidade suporte de carga do solo. A pesquisa foi realizada numa área pertencente a Usina São Martinho, Município de Pradópolis, SP (21°18'67" de latitude sul e 48°11'38" de longitude oeste, 630 m de altitude). Os modelos de capacidade suporte de carga do solo foram construídos a partir dos valores de  $\sigma_p$  obtidos por meio de ensaios de compressão uniaxial em diferentes estados de umidade do solo. O mapeamento da umidade da área foi realizado nos pontos de cruzamento de malhas, com intervalos regulares de 10 m em uma área sob cultivo de cana-de-açúcar e colheita mecanizada. Os valores obtidos foram avaliados por meio da geoestatística. Foi observada dependência espacial para teor de água no solo e  $\sigma_p$  em todas as camadas estudadas com ajuste ao modelo esférico para ambos os atributos. A distribuição espacial da pressão de preconsolidação e da umidade do solo pode ser usada para desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os riscos da compactação adicional ao solo.

**Termos de indexação:** geoestatística, *Saccharum officinarum*, capacidade suporte de carga do solo.

### INTRODUÇÃO

A demanda global por fontes de energia renováveis, em virtude da necessidade de redução do uso de combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de gases poluentes, coloca o Brasil em posição de destaque no setor sucroalcooleiro, ao passo que traz preocupações quanto a aspectos sociais e ambientais, denotando a necessidade da incorporação de novas tecnologias para maximizar

a produção de cana-de-açúcar brasileira racionalizando todo o processo produtivo.

Uma das principais preocupações na atualidade, acerca da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, está relacionada à compactação adicional do solo, no entanto, concomitantemente à compactação, o sistema de colheita de cana crua permite o acúmulo de resíduos sobre e na camada superficial do solo, diferentemente ao de cana queimada (Silva et al., 2009). Esse efeito contrapõe-se à compactação do solo, reduzindo seus efeitos, por aumentar a região de friabilidade em que o solo pode sofrer tráfego e aumentar a resistência do solo à deformação (Araújo et al., 2013).

Na literatura estudos acerca da qualidade estrutural do solo, dão ênfase à compactação do solo de forma pontual relacionada principalmente a densidade e a resistência do solo à penetração. Nesse contexto a pressão de preconsolidação pode ser utilizada como um indicativo de sustentabilidade estrutural do solo, podendo ser considerada uma estimativa da história do estresse ao qual o solo foi submetido e de sua capacidade de suporte de carga (Veenhof & McBride, 1996). A aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo, enquanto que a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas, não recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981).

Estudos acerca da modelagem da compactação de solos agrícolas (Severiano et al., 2010), bem como o conhecimento da capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solo (Iori et al., 2012), e da quantificação dos efeitos do tráfego em diferentes períodos da safra canavieira (Souza et al., 2012) podem tornar-se a base necessária para a minimização dos impactos na estrutura dos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Este trabalho teve por objetivo a caracterização da variabilidade espacial da pressão de preconsolidação num LATOSSOLO VERMELHO sob colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar estimada por modelos de capacidade suporte de carga.

### MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada, em lavoura comercial



no município de Pradópolis, SP (21°18'67" de latitude sul, 48°11'38" de longitude oeste, a 630 m de altitude). O clima é mesotérmico de inverno seco (Cwa), pela classificação de Köppen, com precipitação média de 1.400 mm e chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. O solo foi classificado em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico álico, textura argilosa, com horizonte A moderado e relevo suave-ondulado. O talhão apresenta histórico com mais de 30 anos consecutivos de cultivo intensivo de cana e, nos últimos 12 anos, a colheita foi mecanizada e sem queima (**Tabela 1**).

### Tratamentos e amostragens

O solo foi coletado em uma área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), sem queima e corte mecanizado, desde 1996 (cana crua) e uma área sob vegetação natural, com mata nativa adjacente à área experimental, utilizada como padrão comparativo das análises do solo. A caracterização física do solo foi realizada nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10 m (1,21 ha), perfazendo o total de 121 pontos. Em cada ponto desta malha foi levantada a sua cota, com o auxílio de uma estação total e georreferenciados com DGPS.

Após a colheita da cana-de-açúcar, para a retirada das amostras de solo, foram abertas trincheiras, espaçadas a 0,20 m da soqueira, com 0,50 m de profundidade, 0,40 m de largura e 0,60 m de comprimento, sendo coletadas amostras deformadas para análise da textura do solo e determinação do teor de água no solo obtida pelo método gravimétrico. As avaliações, foram realizadas em amostras de solo com estrutura preservada, retiradas com cilindros volumétricos de 0,0635 m de diâmetro por 0,0254 m de altura, para determinação de atributos físicos e da pressão de preconsolidação.

A pressão de preconsolidação foi quantificada por meio do ensaio de compressão uniaxial, tendo-se aplicado cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa às amostras indeformadas. Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima. Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em consolidômetro automático, com interação entre homem e máquina, modelo CNTA/IHM/BR/001/07 (Silva et al., 2015).

Após o ensaio de compressão, as amostras foram secas em estufa a 105°C, até obtenção de massa constante, para determinação da densidade do solo. A partir da curva de compressão ( $D_s \times \sigma_p$ ), foi estimada a pressão de preconsolidação. Os

dados experimentais foram ajustados à equação:  $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$  (Silva et al., 2015), em que  $\sigma_p$  é a pressão de preconsolidação do solo,  $a$  e  $b$  são coeficientes da equação, e  $U$  é a umidade gravimétrica do solo.

### Análise estatística e geoestatística

De posse dos modelos de capacidade suporte de carga do solo fez-se o ajuste da  $\sigma_p$  em função dos teores de água do solo. A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de variogramas (Vieira, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

em que  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$  são separados por uma distância  $h$ .

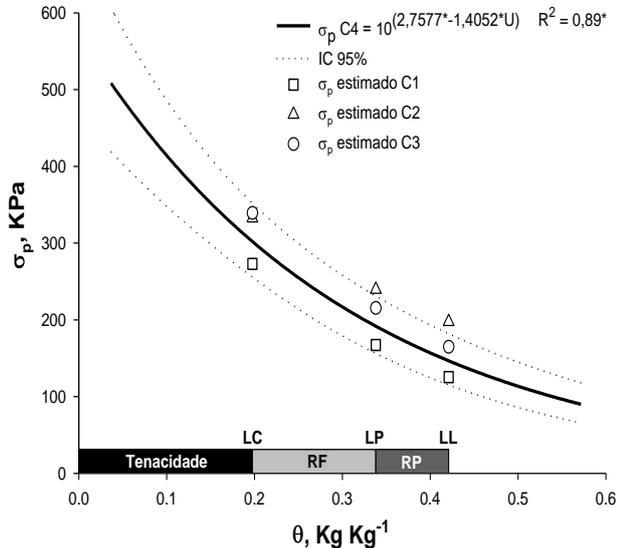
Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se o exame de variogramas, por meio do programa GS+ 10.0.

As análises de regressão relativas aos ensaios de compressibilidade foram realizadas segundo o uso do software Sigma Plot® 8.0 e para comparações entre as regressões do ensaio de compressibilidade. As equações ajustadas foram linearizadas e depois comparadas de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as diferentes camadas de solo estudadas, não se diferenciaram estatisticamente quando comparadas entre si, dentro de cada camada estudada, utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989), procedeu-se então o ajuste de um modelo médio para as camadas estudadas (**Figura 1**).

Os coeficientes de determinação para todas as equações foram significativos e variaram de 88 a 90%, sendo que o coeficiente angular ( $b$ ) e o intercepto ( $a$ ), parâmetros do modelo, apresentaram 99% de significância para todas as camadas estudadas (**Tabela 2**). Sob condições semelhantes, estudando a modelagem da compactação em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Silva et al. (2009) relatam que a modelagem da  $\sigma_p$  deve ser feita com equações distintas, visto que a  $\sigma_p$  nas camadas estudadas são diferentes, fato este não comprovado no presente estudo.



**Figura 1.** Modelo de capacidade suporte de carga e  $\sigma_p$  estimados e observados para os limites de consistência de um LATOSSOLO VERMELHO sob colheita mecanizada, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que: IC = Intervalo de confiança; C1- 0,0 a 0,10 m; C2 - 0,10 a 0,20 m; C3 - 0,20 a 0,30 m; C4 - 0,0 a 0,30 m; LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez

A modelagem da  $\sigma_p$  foi feita por meio do cruzamento dos dados pontuais do teor de água no solo com os modelos preditivos para cada camada de solo (**Tabela 3**). Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para o teor de água no solo e  $\sigma_p$  em todas as profundidades estudadas sendo que, o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico. A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem do teor de água no solo e da  $\sigma_p$  em todas as profundidades estudadas foi menor que 25% indicando grau de dependência espacial forte, de acordo com o critério estabelecido por Cambardella et al. (1994) Portanto, a distribuição espacial do teor de água no solo e da  $\sigma_p$  nas três profundidades não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

### CONCLUSÕES

A pressão de preconsolidação apresenta estrutura de dependência espacial;

A distribuição espacial da pressão de preconsolidação e da umidade do solo pode ser usada para desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os riscos da compactação adicional ao solo.

### AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo financiamento do projeto; e à Usina São Martinho, por disponibilizar a área de estudo.

### REFERÊNCIAS

ARAUJO, F. S. et al. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48:651-660, 2013.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1501-1511, 1994.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733p.

IORI, P. et al. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:1448-1456, 2012.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II – quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, 30:414-423, 2010.

SILVA, R. B. et al. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. *Soil and Tillage Research*, 103:265-270, 2009.

SILVA, R.B. et al. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 39:416-427, 2015

SNEDECOR, G. W & COCHRAN, W. G. Statistical methods. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.

SOUZA, G. S. et al. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47:603-612, 2012.

VEENHOF, D. W & McBRIDE, R. A. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Science Society American Journal*, 60:362-373, 1996.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo, Viçosa: SBCS, v.1. p.1-54, 2000.



**Tabela 1.** Valores médios de granulometria, densidade do solo, teores de matéria orgânica do solo, porosidade e diâmetro médio geométrico de um LATOSSOLO VERMELHO sob colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar nas camadas de 0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Estatística	Areia	Argila	Silte	Densidade	MO	Total	Macro	Micro	DMG
	(g kg <sup>-1</sup> )			(Mg m <sup>-3</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			(mm)
0,00-0,10 m									
Média	193	594	213	1,20	3,23	0,570	0,098	0,472	1,30
CV (%)	17,53	7,69	13,58	9,35	20,57	6,62	68,37	11,67	11,52
0,10-0,20 m									
Média	186	620	194	1,30	2,69	0,549	0,079	0,470	1,28
CV (%)	22,12	8,27	14,86	9,02	20,92	5,38	54,77	8,96	11,40
0,20-0,30 m									
Média	170	646	184	1,30	2,19	0,534	0,065	0,468	1,16
CV (%)	15,74	6,49	18,79	7,86	19,92	5,70	57,03	9,08	11,72

**Tabela 2.** Parâmetros do modelo de capacidade suporte de carga do solo (CSCS) e pressões de preconconsolidação estimadas para três camadas estudadas em um LATOSSOLO VERMELHO sob colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar.

Sistema de Colheita	Camada	Parâmetros do Modelo			$\sigma_p$ (kPa)		
		a	b	R <sup>2</sup>	LC	LP	LL
Mecanizada	0,00-0,10 m	2,74**	-1,52**	0,88**	273	167	125
	0,10-0,20 m	2,72**	-1,01**	0,90**	333	240	198
	0,20-0,30 m	2,81**	-1,61**	0,88**	339	215	165
	0,00-0,30 m	2,76**	-1,41**	0,89**	300	191	147

a = intercepto; b = coeficiente angular; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; \*\* = significativo a 99% de probabilidade;  $\sigma_p$  = pressão de preconconsolidação; LC = limite de contração; LP = limite de plasticidade; LL = Limite de liquidez.

**Tabela 3.** Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconconsolidação ( $\sigma_p$ ) estimadas ( $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ ) e do teor de água no solo de um LATOSSOLO VERMELHO sob colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar nas camadas de 0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	$\sigma_p$ (KPa)			Teor de água no solo (kg kg <sup>-1</sup> )		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C <sub>0</sub>	920,0	127,0	10,0	1,150	1,37	1,38
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	12300,0	543	6357,0	12410,0	5,953	5,832
a (m)	18,2	17,20	17,30	17,10	17,20	15,30
GDE (%)	7,48	23,39	0,02	9,27	23,01	23,66
R <sup>2</sup> (%)	94,5	93,39	91,10	93,10	92,30	94,10
SQR	619015	713	299371,0	0,631	0,118	0,0985

C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.