

Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta

Flávio Carlos Dalchiavon ^(1*); Morel Passos Carvalho ⁽²⁾; Onã Silva Freddi ⁽³⁾; Marcelo Andreotti ⁽²⁾; Rafael Montanari ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ FEIS/UNESP, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Caixa Postal 31, 15385-000 Ilha Solteira (SP), Brasil.

⁽²⁾ FEIS/UNESP, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Ilha Solteira (SP), Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Av. Alexandre Ferronato, 1200, 78550-000 Sinop (MT), Brasil.

⁽⁴⁾ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Rodovia Aquidauana km 12, 79200-000 Aquidauana (MS), Brasil.

(*) Autor correspondente: fcdalchiavon@hotmail.com

Recebido: 26/nov./2010; Aceito: 5/jul./2011

Resumo

O feijão, importante fonte proteica, é um alimento muito comum na dieta da população dos países latino-americanos, sendo o Brasil maior produtor mundial deste legume. Nacionalmente, seu cultivo no sistema de semeadura direta tem crescido ano após ano. Em 2002, foi avaliada a variabilidade espacial do feijoeiro, em função dos atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico no sistema de semeadura direta, em Selvíria (MS) no Cerrado Brasileiro. O objetivo do presente estudo foi selecionar, entre os atributos do solo pesquisado, aquele com a melhor correlação, linear e espacial, para explicar a variabilidade da produtividade do feijoeiro. Foi instalada uma rede amostral, para a coleta de dados do solo e das plantas, com 135 pontos amostrais, em uma área de 7500 m². A produtividade de grãos de feijão (PG) representou o atributo da planta, enquanto os do solo foram: P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, S, T e o V%. Estabeleceram-se correlações lineares, simples e múltiplas, entre a PG e os atributos do solo. Foram modelados semivariogramas para todos os atributos, obtendo-se as respectivas *krigagens* e validações cruzadas. Também foram estabelecidas as *co-krigagens* entre a PG e os atributos do solo. Em relação à produtividade de grãos de feijão, 22% da sua variação foram atribuídos à variação nos atributos químicos do solo. Tanto linear quanto espacialmente, o pH do solo foi bom indicador da produtividade de grãos de feijão quando cultivado sob sistema de semeadura direta.

Palavras-chave: fertilidade do solo, geoestatística, manejo e conservação do solo, *Phaseolus vulgaris* L.

Spatial variability of the bean yield correlated with chemical attributes of a Typic Acrustox under no-tillage system

Abstract

The bean, an important source of protein, is a very important and nutritive food in the diet of Latin-American population, being Brazil the larger world producer of this vegetable. Its cultivation under no-tillage system has increased year after year. In 2002, the spatial variability of the bean yield was evaluated under no-tillage system in a Dystropheric Red Latosol (Typic Acrustox) of the Brazilian Savannah. The main purpose of this study was to select the soil attribute that have the best spatial and linear correlation with bean yield. A geostatistical grid, with 135 sampling points, was installed to collect the soil and plant data in an area of 7,500 m². The bean grains productivity (GP) was the plant attribute, while the soil ones were: P, OM, pH, K, Ca, Mg, H+Al, S, CEC and V%. Linear relationships, simple and multiple, were calculated between the GP and the soil attributes. The semivariograms were adjusted for all the attributes, obtaining krigings and cross-validations and also evaluating the co-krigings between the GP and the soil attributes. In relation to the bean grain yield, around 22% of its variation was attributed to the variation in the soil chemical attributes. From both linear and spatial view points, the soil pH was a good indicator of the bean grains yield under no-tillage system.

Key words: soil fertility, geostatistical, soil management and conservation, *Phaseolus vulgaris* L.

1. INTRODUÇÃO

A planta do feijoeiro produz um legume reconhecidamente uma excelente fonte proteica de carboidratos, vitaminas, minerais, fibras e compostos fenólicos que podem reduzir a incidência de doenças, além de ser um dos mais importantes componentes da dieta alimentar do brasileiro. Paralelamente a este fato, o feijão é um dos produtos agrícolas de maior importância econômico-social, devido principalmente à mão de obra empregada durante o ciclo da cultura e o número de cultivos possíveis nas diversas regiões produtoras do país.

Segundo CONAB (2010), considerando-se as três safras, estima-se que a área total cultivada com feijão no Brasil (maior produtor mundial do grão), na safra de 2009/2010 ficou em torno de 3,58 milhões de hectares, resultando em uma produção nacional de 3,27 milhões de toneladas, com produtividade média de 913 kg ha⁻¹. Especificamente para o Estado de Mato Grosso do Sul, a produtividade média foi de 1456 kg ha⁻¹.

O cultivo do feijoeiro em sistema de semeadura direta (SD) merece destaque em virtude dos inúmeros benefícios que podem decorrer de seu uso, tanto econômicos quanto ambientais. De acordo com NICOLDI et al. (2008), os benefícios para o solo são: aumento dos teores de matéria orgânica (MO) e de nutrientes, diminuição da toxidez do Al às plantas, melhoria da estrutura e da capacidade de retenção de água, aumento da fertilidade na camada superficial e preservação das relações microbiológicas construídas com o tempo de cultivo, principalmente pelo não revolvimento e a consequente manutenção dos resíduos das culturas na superfície. Tendo em vista tais benefícios, vários estudos têm sido desenvolvidos com a cultura do feijoeiro em SD. FAGERIA e STONE (2004) pesquisaram a produtividade de feijão com aplicação de calcário e zinco e verificaram incremento significativo na produtividade com a aplicação de calcário. SANTOS et al. (2004) avaliaram o comportamento de cultivares de feijoeiro-comum com diferentes palhadas no solo e comprovaram que no solo com pequena quantidade de palha, o plantio direto sobre resteva do pousio propiciou maior rendimento de grãos. BARBOSA et al. (2010) pesquisaram nitrogênio em cobertura e molibdênio foliar no feijoeiro de inverno e averiguaram efeito significativo das doses de nitrogênio sobre alguns dos componentes de produção.

Por outro lado, o processo de modernização e racionalização da agricultura constitui fator importante para o aumento da produtividade. O custo crescente dos insumos agrícolas exige, cada vez mais, a adoção de técnicas de cultivos adequadas na produção das culturas anuais. Desta forma, há tendência de integração de diversas fontes de dados, a fim de melhor gerenciar a produção agrícola, ocorrida em virtude do reconhecimento cada vez maior de que as culturas e os solos não devem ser manejados individualmente e de forma homogênea. GREGO e VIEIRA (2005)

afirmaram que a aplicação de tecnologia associada à variabilidade espacial se faz necessária, sobretudo na pesquisa agrícola, que estuda o solo e sua capacidade produtiva. Reforçando esta questão, MOLIN (2000) salientou que a agricultura de precisão surgiu como um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que os sistemas de produção agrícolas sejam otimizados, tendo como elemento-chave, o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e os fatores a ela relacionados.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi selecionar entre os atributos do solo avaliados, aquele com a melhor correlação, linear e espacial, para explicar a variabilidade da produtividade de grãos de feijão de inverno sob sistema plantio direto no Cerrado brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no município de Selvíria (MS), entre as latitudes de 20°18'05"S e 20°18'28"S e as longitudes de 52°39'02"W e 52°40'28"W. A precipitação pluvial média anual local é de 1300 mm, enquanto a temperatura média do ar, de 23,7 °C. Conforme preceitos de Köppen referidos por VIANELLO e ALVES (2004), o clima regional é o tropical úmido megatérmico (Aw), com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo da área experimental é Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 2006) irrigado por pivô central, cuja caracterização inicial da fertilidade, para a camada de 0-0,20 m, possui os seguintes valores: pH (CaCl₂) = 5,0; MO = 27 g dm⁻³; P (resina) = 18 mg dm⁻³; K, Ca, Mg e H+Al = 4,1; 22; 15 e 36 mmol_c dm⁻³, respectivamente; com V = 53,3%. Na figura 1, estão indicadas as precipitações pluviais e temperaturas médias durante o período de cultivo.

A área experimental já era cultivada há seis anos sob SD, com a sucessão milho/feijão. Assim, o cultivo do feijoeiro ocorreu com a dessecação da cultura antecessora (milho) e das plantas daninhas remanescentes com a aplicação de 1,8 kg ha⁻¹ (i.a.) do herbicida glifosato, entre os dias 15 e 18/4/2002. Em 6/5/2002 foi semeada a cultivar de feijoeiro IAC Carioca Eté, no espaçamento de 0,50 m entre linhas, com 15 sementes m⁻¹, proporcionando densidade média de 12 plantas m⁻¹. Na adubação de semeadura foram utilizados 200 kg ha⁻¹ da fórmula 08-28-16 (NPK). Na adubação de cobertura realizada 20 dias após a emergência das plântulas, foram aplicados 200 kg ha⁻¹ da fórmula 20-00-20 (NPK). As práticas de manejo da cultura foram procedidas homogêneas em toda a área experimental. A colheita da cultura foi efetuada manualmente aos 96 dias após a emergência das plantas (9/8/2002) e o material proveniente de cada ponto amostral foi posto para secar à sombra, sendo posteriormente trilhado, peneirado e pesado para se obter a produtividade de grãos.

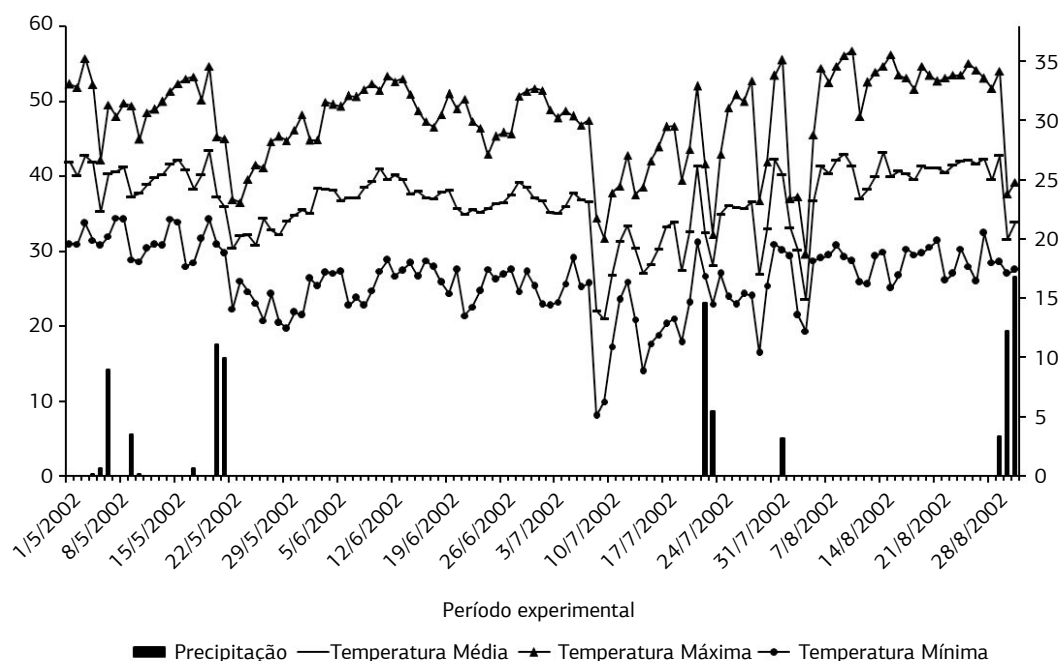


Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura do ar (mínima, máxima e média) durante o período de maio a agosto de 2002.

Na alocação da malha amostral, estabelecida entre dois terraços, foram definidas as direções *x* e *y* do sistema de coordenadas cartesianas. Para tanto, foi utilizado um nível ótico comum, efetuando-se o estaqueamento global da malha experimental logo após a semeadura da cultura. A grande malha experimental foi constituída de cinco transeções paralelas ao eixo *x*, contendo 15 pontos de amostragem cada uma, resultando em 75 pontos amostrais, com espaçamento entre pontos de 10 m x 10 m, em uma área total de 7500 m² (150 m x 50 m). Entretanto, foram alocadas por sorteios, dentro da grande malha, mais quatro transeções de pontos amostrais, visando detalhar o estudo da dependência espacial dos dados para condições menores do que 10 m. Cada pequena malha ficou posicionada entre quatro pontos amostrais da grande malha, com um ponto no seu centro e mais 14 pontos; sete destes ficaram distribuídos no segundo quadrante e o restante no quarto quadrante da pequena malha, com espaçamento entre pontos de 2,5 m x 2,5 m. Cada uma delas adicionou mais 15 pontos amostrais, ficando o total de 135 (75 + 60).

Foram avaliados atributos do solo e das plantas, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral da malha experimental. Os atributos do solo avaliados foram: teores de fósforo (P), matéria orgânica (MO), valores de pH (CaCl₂), teores de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T) e a saturação por bases (V%). Para tal, foi coletada uma única amostra simples de solo, com trado de caneca (diâmetro = 0,08 m, altura = 0,20 m, volume = 0,001 m³), em cada um dos 135 locais de coleta dos dados, na profundidade

de 0 a 0,20 m, e destinada à análise química para fins de fertilidade, realizada conforme CANTARELLA et al. (2001).

Foi avaliada a produtividade de grãos de feijão (PG), sendo esta corrigida para a condição de umidade de 13% (base úmida) através da obtenção de duas leituras do valor da umidade dos grãos, e calculada segundo a seguinte expressão:

$$P_c = P \cdot [(1 - u_d) / (1 - u_{ob})] \quad (1)$$

onde: P_c representou a massa corrigida dos grãos de feijão (kg ha⁻¹); P representou a massa de campo (não corrigida) dos grãos de feijão (kg ha⁻¹); u_d representou a umidade desejada como padrão (13%), e u_{ob} representou a média das duas umidades observadas para cada ponto amostral (%). A umidade dos grãos foi obtida através de aparelho próprio, de leitura digital e funcionamento a pilha (Marca Dickey-John modelo Multi-Grain). A PG (kg ha⁻¹) foi obtida através da coleta das plantas no entorno de cada ponto amostral, com área útil de 4 m² (2 m x 2 m), com a alocação do ponto posicionado no seu centro, entre quatro linhas de semeadura.

A análise estatística dos atributos estudados foi constituída da análise descritiva inicial, estudo de regressão linear e análise geoestatística. Utilizou-se o SAS (SCHLOTZHAVER e LITTEL, 1997) para calcular a média, mediana, valor mínimo e máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Para testar a hipótese da normalidade, ou da lognormalidade dos dados, foi utilizado o teste de SHAPIRO e WILK (1965) a 1%. Assumiu-se a princípio, a não transformação logarítmica

dos atributos com distribuição de frequência lognormal, única e exclusivamente tendo como objetivo de se trabalhar com os dados originais deles. A correção dos *outliers* foi procedida mediante o cálculo da média aritmética dos valores dos pontos vizinhos na malha de estudo.

Foi montada a matriz de correlação de Pearson objetivando efetuar as correlações lineares para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados, assim como apresentar as análises de regressões para os pares de maior interesse. Selecionaram-se aqueles de maior correlação linear e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a consequente *co-krigagem*. Com o auxílio do pacote computacional *Gamma Design Software 7.0* (Gs⁺, 2004) foi efetuada a análise da dependência espacial, para cada atributo estudado, pela aplicação da hipótese intrínseca na modelagem do semivariograma. O ajuste do melhor modelo foi efetuado segundo: 1- menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); 2- maior coeficiente de determinação (r²); 3- maior valor do avaliador da dependência espacial (ADE), conforme DALCHIAVON et al. (2011). Entretanto, para os atributos (ATR) com tendência no semivariograma, retirou-se essa tendência por meio da técnica da regressão múltipla polinomial, conforme preceitos de DAVIS (1986). Assim, ficaram precedidos do símbolo # quando referidos na análise semivariográfica e na validação cruzada (#ATR). Já quando referidos no mapa de *krigagem* e/ou *co-krigagem* ficaram precedidos por £ (£ATR).

A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de *krigagem* e/ou *co-krigagem*, realizadas por meio da *krigagem* em blocos. Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (C₀), o alcance (A₀) e o

patamar (C₀+C). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a Equação 2.

$$ADE = (C / (C + C_0)) \times 100 \quad (2)$$

Em que: ADE é o avaliador da dependência espacial, C é a variância estrutural e C+C₀ é o patamar. Desta forma, a interpretação proposta para ADE foi: a) ADE ≤ 25%, indicou variável espacial fracamente dependente; b) 25% < ADE ≤ 75%, indicou variável espacial medianamente dependente; c) ADE > 75%, indicou variável espacial fortemente dependente, conforme sugestões de CAMBARDELLA et al. (1994), modificadas pelo Gs⁺ (2004).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos pesquisados (Tabela 1) tiveram baixa variabilidade dos dados para o pH, com coeficiente de variação (CV) de 7,3%; média variabilidade para a matéria orgânica e saturação por bases (CV = 13,8-13,9%); alta variabilidade para a produtividade de grãos, acidez potencial e capacidade de troca catiônica (CV = 20,0-20,4%), e muito alta variabilidade para os demais atributos (CV = 30,4-64,5%) (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2002). A elevada variabilidade dos nutrientes no solo é comum em SD pelo efeito localizado de adubações, principalmente no caso do P, com baixa mobilidade no solo. Com relação ao K, como a cultura antecessora foi o milho em espaçamento de 0,90 m, a adubação também pode interferir nos resultados, pois mesmo utilizando trado de caneca, na coleta das amostras podem ocorrer erros amostrais por efeito de linhas e entrelinhas de culturas adubadas anteriormente na área. Desta alta variabilidade surge a necessidade de técnicas

Tabela 1. Análise da estatística descritiva da produtividade do feijão e de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto.

Atributo	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio-padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste	
			Mínimo	Máximo		Varição (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Atributo da planta										
PG (kg ha ⁻¹)	3044	3051	1405	4647	618,1	20,3	-0,060	-0,028	0,838	NO
Atributos químicos do solo										
P (mg dm ⁻³)	28,4	23,0	4,0	97,0	18,33	64,5	-0,309	0,010	0,637	LN
MO (g dm ⁻³)	25,3	25,0	18,0	34,0	3,51	13,9	-0,744	0,148	0,014	IN
pH	5,07	5,10	4,20	6,20	0,371	7,3	0,230	0,350	0,072	NO
K (mmol _c dm ⁻³)	5,05	5,00	1,30	9,20	1,943	38,5	-1,012	0,062	0,007	IN
Ca (mmol _c dm ⁻³)	28,8	28,0	10,0	53,0	9,31	32,3	-0,655	0,243	0,050	NO
Mg (mmol _c dm ⁻³)	18,0	18,0	6,0	34,0	5,75	31,9	-0,344	0,229	0,203	NO
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	27,6	27,0	18,0	42,0	5,52	20,0	-0,147	0,649	2.10 ⁻⁴	IN
S (mmol _c dm ⁻³)	52,04	51,20	17,70	97,40	15,816	30,4	-0,361	0,257	0,260	NO
T (mmol _c dm ⁻³)	79,83	78,40	35,71	120,60	16,250	20,4	-0,178	0,004	0,797	NO
V%	64,0	64,0	41,0	83,0	8,82	13,8	-0,344	-0,354	0,058	NO

PG = produtividade de grãos do feijão; P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, S, T, V% são, respectivamente, fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases. DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN e IN, respectivamente, tipo normal, lognormal e indefinida.

mais apuradas como a agricultura de precisão que levam em consideração justamente esse efeito do erro amostral de coleta de solo.

No geral, os dados do presente estudo (Tabela 1) propiciaram tendência à variabilidade de forma análoga aos de CAVALCANTE et al. (2007), que em um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria (MS) estudaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas de vegetação natural, pastagem, plantio direto e plantio convencional; nas áreas de plantio direto e convencional, adotou-se a rotação de culturas com feijão, milho, soja e aveia preta, e constataram as maiores variabilidades nos dados de P e K. Da mesma forma, foram semelhantes à pesquisa de AMADO et al. (2009), que analisaram dois Latossolos Vermelhos Distróficos nos municípios de Trindade do Sul e Palmeira das Missões, no Rio Grande do Sul, em SD de milho e feijão irrigados por pivô central, e verificaram maior variabilidade nos dados de P, e menor nos de pH do solo.

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, será representada pela mediana, ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (MONTANARI et al., 2010). Desta forma, dentre os atributos analisados, observou-se distribuição de frequência do tipo normal em PG, pH, Ca, Mg, S, T e V%, sendo significativos pelo teste de normalidade de SHAPIRO e WILK (1965), uma vez que seus valores oscilaram entre 0,050 e 0,838 (Tabela 1).

Analisando a tabela 1 é possível constatar ainda que o valor médio da PG foi de 3044 kg ha⁻¹. Este valor superou em 60% a produtividade de grãos de feijão de 1900 kg ha⁻¹ obtida por SUZUKI et al. (2007) e em 38% a de SANTOS et al. (2005), que relataram valor de 2208 kg ha⁻¹. Em relação à média nacional (913 kg ha⁻¹), bem como à média do Mato Grosso do Sul (1456 kg ha⁻¹), referidas pela CONAB (2010), os valores foram, respectivamente, 233% e 109% superior. Para SUZUKI et al. (2003), esta

considerável produtividade de grãos de feijão, possivelmente, está relacionada ao SD, que proporciona melhor armazenamento de água no solo bem como melhores condições químicas para o suprimento da cultura.

Para os atributos químicos do solo, cuja distribuição de frequência foi do tipo normal, as médias obtidas foram 5,10; 28,0 mmol_c dm⁻³; 18,0 mmol_c dm⁻³; 51,20 mmol_c dm⁻³; 78,40 mmol_c dm⁻³; 64,0% para pH, Ca, Mg, S, T e V%, respectivamente (Tabela 1). Foi possível verificar ainda que os valores medianos da MO, K e H+Al, cuja distribuição de frequência foi do tipo indefinida, foram, respectivamente, 25,0 g dm⁻³, 5,00 mmol_c dm⁻³ e 27,0 mmol_c dm⁻³ e para o P, com distribuição de frequência do tipo lognormal, a mediana obtida foi de 23,0 mg dm⁻³, podendo-se assim inferir que, na média, o solo estava em boas condições de fertilidade para cultivo de feijão de inverno (AMBROSANO et al., 1996). Valores superiores, com exceção do K, foram obtidos por CAVALCANTE et al. (2007), na camada de 0-0,10 m, que normalmente é a mais fértil quando comparada com a camada de 0-0,20 m, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso sob SD há 20 anos, sendo: 42,4 g dm⁻³ para a MO; 4,6 mmol_c dm⁻³ para o K; 108,0 mmol_c dm⁻³ para a T (valores médios) e mediana de 32,0 mg dm⁻³ para o P.

Conforme a tabela 2, nas correlações entre PG e os atributos do solo houve significância somente para os pares PG x MO (r = 0,212*) e PG x pH (r = 0,295**). Para ambas as correlações, o comportamento foi direto, indicando que com o aumento da MO e do pH haverá aumento da produtividade de grãos de feijão, fato interessante em SD, haja vista que este sistema visa incrementar os teores de MO, influenciando o pH do solo (MIYAZAWA et al., 2000). REICHERT et al. (2008) também constataram correlação direta entre a produtividade de grãos e o pH na camada de 0-0,15 m, onde o coeficiente de correlação foi de 0,697, significativo a 1% de probabilidade, demonstrando ser a cultura do feijão suscetível à acidez do solo.

Tabela 2. Matriz de correlação linear entre a produtividade de grãos do feijão de inverno e de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto

Atributos	Coeficiente de correlação ⁽¹⁾									
	PG	P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	S	T
P	-0,140									
MO	0,212*	0,066								
pH	0,295**	-0,143	0,495**							
K	0,111	0,194*	0,280**	0,190*						
Ca	-0,023	0,076	0,338**	0,141	0,385**					
Mg	-0,013	-0,027	0,339**	0,164	0,282**	0,902**				
H+Al	-0,072	0,263**	-0,170*	-0,798**	-0,075	-0,106	-0,137			
S	0	0,052	0,370**	0,180*	0,454**	0,974**	0,953**	-0,133		
T	-0,033	0,144	0,311**	-0,098	0,424**	0,915**	0,889**	0,211*	0,933**	
V%	0,053	-0,071	0,345**	0,497**	0,403**	0,831**	0,826**	-0,568**	0,857**	0,629**

PG = produtividade de grãos do feijão; P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, S, T, V% são, respectivamente, fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases. ⁽¹⁾ ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

Neste contexto, as correlações entre os pares de atributos do solo do presente trabalho evidenciaram correlação direta da MO com todos os demais ($r = 0,280^{**}$ a $0,495^{**}$), com exceção da H+Al, cuja correlação foi inversa ($r = -0,170^*$) e com o P, que não apresentou correlação significativa (Tabela 2). É provável que, no solo cultivado por longo período no SD, as correlações da MO com os demais atributos químicos do solo, se manifestem mais intensamente, influenciando a disponibilidade e a absorção de nutrientes e a produtividade das culturas (NICOLODI et al., 2008). Desta forma, pode-se afirmar que a matéria orgânica desempenha importante papel à sustentabilidade do sistema produtivo por ser um colóide orgânico responsável por boa parte da T do solo.

Para as correlações entre os atributos das plantas x solo (Tabela 2), os modelos matemáticos $PG = f(\text{pH})$ e $MO = f(\text{pH})$, observou-se variação direta entre causa e efeito, sendo os modelos do tipo linear e potencial, com coeficientes de correlação de $0,295^{**}$ e $0,506^{**}$ respectivamente (Figura 2a,b). A ausência de correlação entre PG x S ($r = 0$) pode ter ocorrido em virtude de o experimento ter sido desenvolvido em área sob pivô central, cujas bases Ca, Mg e K não têm limitação em sua disponibilidade para a cultura do feijoeiro, pois estavam prontamente disponíveis na solução do solo e em quantidades equilibradas para essa cultura.

Na análise de regressão múltipla da PG, em função de todos os atributos do solo, o modelo testado (Equação 3) explicou aproximadamente 22% da variação da produtividade de grãos de feijão ($r^2 = 0,221^{**}$).

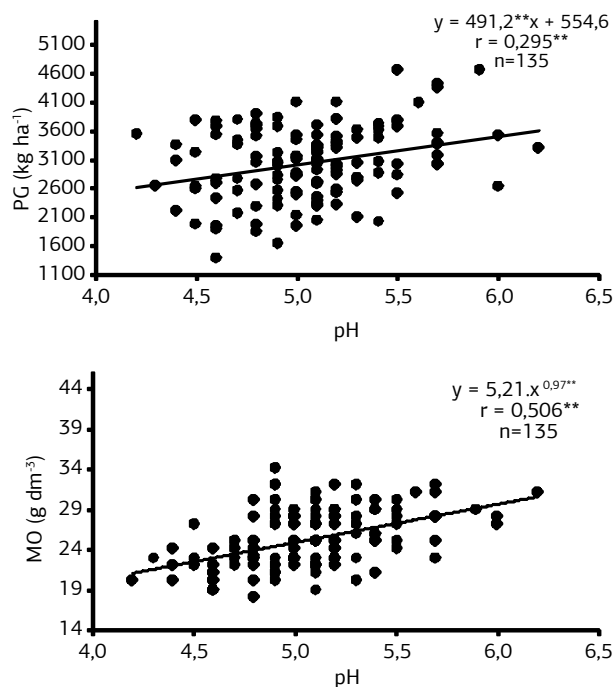


Figura 2. Equações de regressão da produtividade de grãos de feijão de inverno e do teor de matéria orgânica do solo em função do pH de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto.

$$PG = -7,62.10^3 - 6,88 (P) - 2,80 (MO) + 1,19.10^3 (pH) - 3,85 (K) - 2,75.10 (Ca) - 4,07.10 (Mg) + 8,73.10 (H+Al) - 8,43 (S) + 1,34 (T) + 5,29.10 (V\%) \quad (3)$$

De acordo com a tabela 3, com exceção do P que proporcionou efeito pepita puro (heterogeneidade em função de adubações antecedentes e baixa mobilidade do elemento no solo), todos os demais atributos tiveram dependência espacial. Assim, os coeficientes de determinação espacial (r^2) observados nos semivariogramas, decresceram na seguinte ordem: 1) K (0,963), 2) V% (0,942), 3) pH (0,936), 4) PG (0,923), 5) T (0,901), 6) Ca (0,875), 7) S (0,861), 8) Mg (0,855), 9) MO (0,787) e 10) #H+Al (0,752). Portanto, em vista de ter sido apresentada aleatoriamente a menor dispersão dos *lags* em torno do modelo exponencial ajustado, o melhor semivariograma foi o do K ($r^2 = 0,963$), com ADE médio de 58,9% e alcance de 24,9 m. CAVALCANTE et al. (2007) também observaram que o K foi o elemento com o melhor ajuste semivariográfico (ADE = 48% e $r^2 = 0,963$), porém o modelo do semivariograma (esférico) e o alcance (10,8 m) obtidos diferiram desta pesquisa.

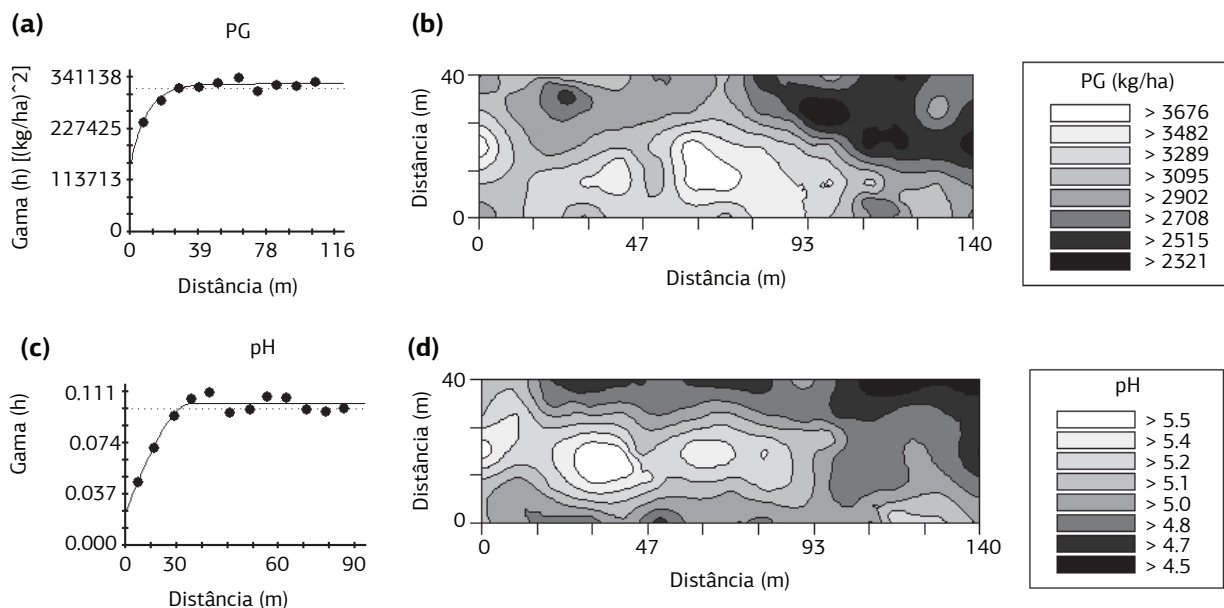
Para a saturação por bases (V%), seu r^2 (0,942) indicou ser o segundo atributo de melhor ajuste semivariográfico, com ADE média (70,9%), semelhante ao de AMADO et al. (2009), porém com modelo ajustado do tipo esférico, diferindo do modelo gaussiano obtido neste trabalho, cujo alcance foi de 15,1 m (Tabela 3). O pH foi o terceiro atributo do solo com melhor ajuste do semivariograma ($r^2 = 0,936$), com ADE de 76,7% (alta), modelo esférico (Tabela 3; Figura 3c) e alcance de 25,8 m, concordando com AMADO et al. (2009), que também obtiveram modelo esférico e uma dependência espacial alta (ADE = 88%). O quarto melhor ajuste semivariográfico foi o da PG, cujo r^2 foi 0,923. O modelo do semivariograma ajustado foi o exponencial (Tabela 3; Figura 3a) com ADE de 55,3%, sendo, portanto classificado como atributo de média dependência espacial e alcance de 28,5 m, discordando de MARTINS et al. (2009) que relataram um ajuste semivariográfico do tipo esférico para a produtividade do feijão cultivado em SD em Latossolo Vermelho Distroférico e alcance de 17,8 m.

Ainda na tabela 3 é possível observar que a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) T (38,8 m), 2) PG (28,5 m), 3) pH (25,8 m), 4) K (24,9 m), 5) #H+Al (17,0 m), 6) Mg (16,0 m), 7) V% (15,1 m), 8) MO (14,1 m), 9) Ca (13,7 m) e 10) S (13,0 m). Esse resultado leva à sugestão de que em trabalhos futuros, que utilizem malhas geoestatísticas e distância entre pontos iguais aos do presente, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, em geral, deverão estar compreendidos entre 13,0 m e 38,8 m, por representarem a distância dentro

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para a produtividade do feijão de inverno e de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto

Atributo	Parâmetros do ajuste										
	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A ₀ (m)	r ²	SQR	ADE		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
γ(h) simples - planta											
PG	exp (816)	1,46.10 ⁵	3,27.10 ⁵	28,5	0,923	5,54.10 ⁸	55,3	média	-4,00	1,002	0,467
γ(h) simples - solo											
P	epp	3,19.10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO	gau (381)	3,33	8,98	14,1	0,787	3,45	62,9	média	-0,39	1,005	0,603
pH	esf (339)	2,40.10 ⁻²	1,03.10 ⁻¹	25,8	0,936	2,42.10 ⁻⁴	76,7	alta	0,54	0,892	0,585
K	exp (298)	1,38	3,36	24,9	0,963	4,59.10 ⁻²	58,9	média	1,19	0,753	0,295
Ca	esf (208)	1,01.10	7,04.10	13,7	0,875	1,84.10 ²	85,7	alta	-0,29	0,999	0,577
Mg	gau (375)	8,54	2,32.10	16,0	0,855	2,06.10	63,2	média	1,03	0,939	0,524
#H+Al	gau (324)	1,07.10	2,14.10	17,0	0,752	2,53.10	50,0	média	0,31	1,000	0,436
S	gau (138)	3,99.10	2,04.10 ²	13,0	0,861	3,48.10 ³	80,4	alta	1,43	0,964	0,593
T	esf (145)	8,81.10	1,94.10 ²	38,8	0,901	1,62.10 ³	54,6	média	-0,37	1,002	0,596
V%	gau (275)	2,00.10	6,68.10	15,1	0,942	8,70.10	70,9	média	-3,47	1,047	0,645
γ(h) cruzado - planta x solo											
PG=f(MO)	gau (259)	1,00	3,82.10 ²	26,0	0,689	6,75.10 ⁻⁴	99,7	alta	9,68.10 ²	0,685	0,487
PG=f(pH)	gau (532)	1,00.10 ⁻¹	6,31.10	28,8	0,925	3,60.10 ²	99,8	alta	9,57.10 ²	0,685	0,482
γ(h) cruzado - solo x solo											
MO=f(pH)	gau (318)	2,00.10 ⁻⁵	4,77.10 ⁻¹	18,0	0,806	2,96.10 ⁻²	99,6	alta	5,18	0,793	0,610

PG = produtividade de grãos de feijão, P = fósforo, MO = matéria orgânica, pH = potencial hidrogeniônico, K = potássio, Ca = cálcio, Mg = magnésio, #H+Al = acidez potencial, S = soma de bases, T = capacidade de troca de cátions e V% = saturação por bases; parênteses sucedendo o modelo = número de pares no primeiro lag. exp = exponencial; epp = efeito pepita puro; gau = gaussiano e esf = esférico. SQR = soma dos quadrados dos resíduos. ADE = avaliador da dependência espacial.

**Figura 3.** Semivariogramas e mapas de *krigagem* da produtividade do feijão de inverno e do pH de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto.

da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si.

Na figura 3b, visualiza-se no mapa de *krigagem* que os maiores valores da PG (3095 a 3676 kg ha⁻¹) ocorreram no sentido Centro-Oeste, bem como nas regiões Sudoeste, Sul e Sudeste, estabelecidas no terço horizontal inferior. Nas demais regiões (Leste e travessão

horizontal superior) a produtividade oscilou entre 2321 e 3095 kg ha⁻¹. Foi evidenciada a semelhança direta entre os mapas de *krigagem* da PG e do pH (Figura 3b,d). Assim, nos sítios onde ocorreram os maiores valores de pH (5,1 a 5,5), no sentido Centro-Oeste e região Sudeste do mapa, foram justamente os locais onde também ocorreram as maiores PGs (3095 a 3676 kg ha⁻¹).

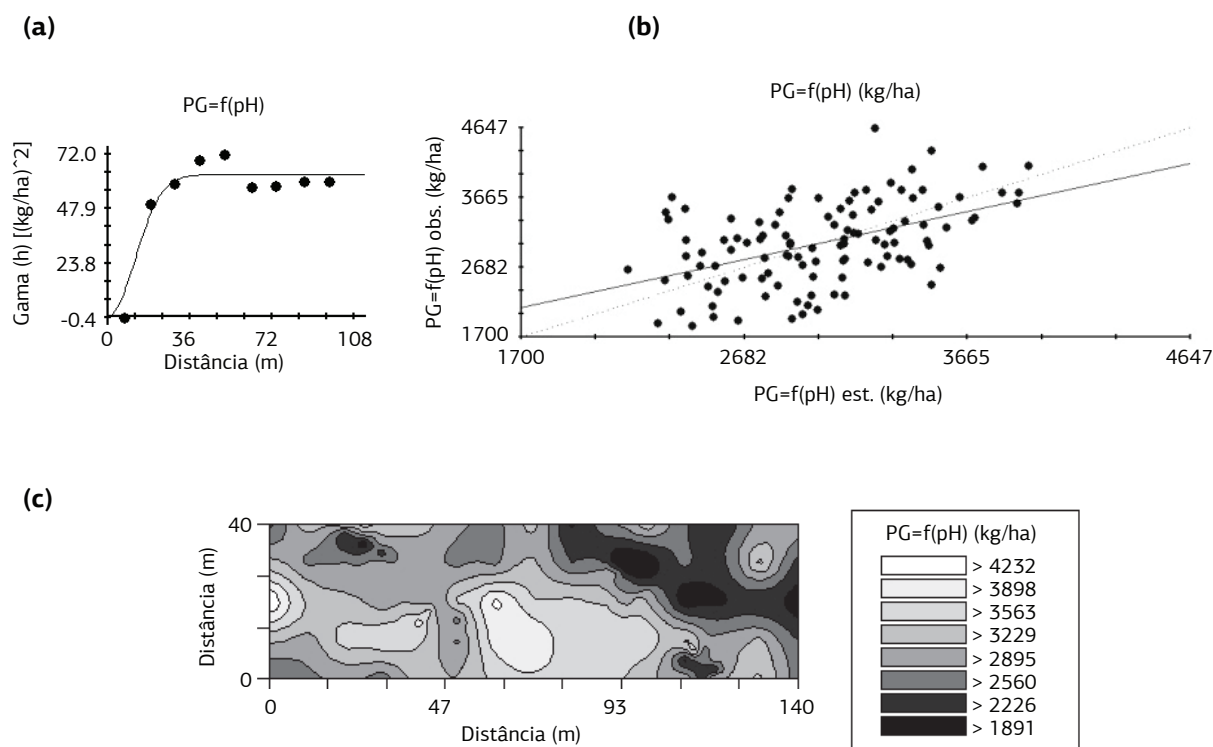


Figura 4. Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de *co-krigagem* da produtividade do feijão de inverno em função do pH de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto.

Por outro lado, nas demais regiões, com os menores valores de pH (4,5 a 5,1), ocorreram as menores PGs (2321 e 3095 kg ha⁻¹), demonstrando ser o feijoeiro sensível ao pH do solo.

Em termos de *co-krigagem*, o melhor ajuste foi entre PG e pH, seguido da MO e pH ($r^2 = 0,806$) e da PG e MO ($r^2 = 0,689$) (Tabela 3). RACHID JUNIOR et al. (2006) também constataram *co-krigagens* entre os dados de PG com pH e PG com MO. No caso da PG e pH, 92,5% da variabilidade espacial da produtividade de feijão puderam ser explicados pela variabilidade espacial do pH, de forma que os maiores valores de produtividade de feijão foram registrados justamente nas regiões com maiores valores de pH (Figura 4c). A dependência espacial para esta *co-krigagem* foi alta (ADE=99,8%), sendo ajustado o modelo do tipo gaussiano (Tabela 3; Figura 4a) com o alcance de 28,8 m. Dados semelhantes de *co-krigagem* da PG e pH também foram relatados por RACHID JUNIOR et al. (2006), onde o ADE foi alto (96,4%), com alcance de 21,5 m e ajuste do modelo do tipo esférico.

Assim, pode-se inferir que a variabilidade espacial entre os atributos pH e MO do solo com a produtividade de grãos de feijão seguiram o mesmo comportamento linear; portanto, pela *co-krigagem* de alta significância, pode-se estimar a produtividade do feijão pelo efeito direto do aumento do pH e do teor de MO do solo na camada de 0-0,20 m em solo de Cerrado.

4. CONCLUSÃO

Para a produtividade de grãos de feijão de inverno, a análise de regressão múltipla indica que 22% de sua variação é atribuída à variação nos atributos químicos do solo (P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, S, T e V%).

Os atributos químicos têm dependência espacial classificada como média e alta, com modelo dos semivariogramas ajustados predominantemente do tipo gaussiano.

Tanto linear quanto espacialmente, o pH do solo se destaca como um potencial indicador da produtividade de grãos de feijão quando cultivado sob sistema plantio direto.

REFERÊNCIAS

- AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L.; SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.831-843, 2009.
- AMBROSANO, E.J. TANAKA, R.T. MASCARENHAS, H.A.A. Leguminosas e Oleaginosas. IN: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1996. p.189-204. (Boletim Técnico 100)
- BARBOSA, G.F.; ARF, O.; NASCIMENTO, M.S.; BUZETTI, S.; FREDDI, O.S. Nitrogênio em cobertura e molibdênio foliar no feijoeiro de inverno. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.32, p.117-123, 2010.

- 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 American Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; COSCIONE, A.R.; ANDRADE, J.C. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). *Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. *Ciência Rural*, v.37, p.394-400, 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: grãos, décimo segundo levantamento, setembro 2010. Brasília: CONAB, 2010. 41p.
- DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; NOGUEIRA, D.C.; ROMANO, D.; ABRANTES, E.L.; ASSIS, J.T.; OLIVEIRA, M.S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.41, p.8-19, 2011.
- DAVIS, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. 2.ed. New York: John Wiley, 1986. 646p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS). 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.73-78, 2004.
- GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.169-177, 2005.
- GS*. *Geostatistics for environmental sciences*. 7.ed. Plainwell, Michigan: Gamma Design Software, 2004. 159p.
- MARTINS, M.V.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.31, p.147-154, 2009.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. *Informações Agronômicas*, v.92, p.1-8, 2000.
- MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: fundamentos e estado atual da arte. In: CÂMARA, G.M. *Soja: Tecnologia da Produção II*. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Produção Vegetal, 2000. p.423-437.
- MONTANARI, R.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F.C.; LOVERA, L.H.; HONORATO, M.A.O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1811-1822, 2010.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.237-247, 2008.
- PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. *Estatística aplicada a experimentos agrônomicos e florestais*. 11.ed. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- RACHID JUNIOR, A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G.; JOHANN, J.A. Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade da soja num sistema de agricultura de precisão. *Engenharia na Agricultura*, v.14, p.156-169, 2006.
- REICHERT, J.M.; DARIVA, T.A.; REINERT, D.J.; SILVA, V.R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. *Ciência Rural*, v.38, p.981-988, 2008.
- SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E.; VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica a penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.287-295, 2005.
- SANTOS, R.L.L.; CORRÊA, J.B.D.; ANDRADE, M.J.B.; MORAIS, A.R. Comportamento de cultivares de feijoeiro-comum em sistema convencional e plantio direto com diferentes palhadas. *Ciência e Agrotecnologia*, v.28, p.978-989, 2004.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. *SAS system for elementary statistical analysis*. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: Complete samples. *Biometrika*, v.52, p.591-611, 1965.
- SUZUKI, L.E.A.S.; ALVES, M.C.; ENCIDE, A.P. Influência de plantas de cobertura, preparos do solo e sucessão de culturas na produtividade de grãos de feijão em um Latossolo Vermelho de cerrado. *Cultura Agrônoma*, v.12, p.1-16, 2003.
- SUZUKI, L.E.A.S.; ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. Rendimento do feijoeiro influenciado por sistemas de manejo em um Latossolo Vermelho de cerrado. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.29, p.121-126, 2007.
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. 449p.