

UNIOESTE - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ *CAMPUS DE*
CASCVEL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENERGIA NA
AGRICULTURA – PPGEA

MAYCON DANIEL VIEIRA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS
DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO
RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe*
abyssinica Hochst)**

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
JULHO – 2012

MAYCON DANIEL VIEIRA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS
DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO
RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe
abyssinica* Hochst)**

Dissertação apresentada a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura – Nível Mestrado, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco

Co-orientador: Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos

Co-orientador: Dr. Emerson Vitor Castelani

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JULHO – 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

V716v Vieira, Maycon Daniel
Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um
Latossolo argiloso correlacionados ao rendimento de grãos da cultura do
Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). / Maycon Daniel Vieira— Cascavel,
PR: UNIOESTE, 2012.
31 p.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco
Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos
Coorientador: Dr. Emerson Vitor Castelani
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Geoestatística. 2. Culturas energéticas. 3. Mapas temáticos. I.
Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

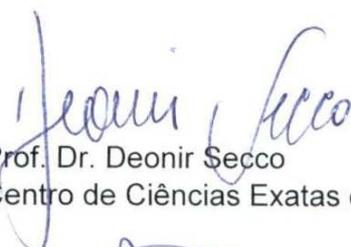
CDD 21.ed. 631.3

MAYCON DANIEL VIEIRA

“Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um Latossolo argiloso correlacionados ao rendimento de grãos da cultura do crambe (*Crambe Abyssinica* Hochs)”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovado** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Deonir Secco
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Amarildo de Vicente
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva
Universidade Federal de Santa Maria, UFMS/Rio Grande do Sul

Cascavel, 13 de julho de 2011.

À minha esposa Amanda.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por conceder esta importante etapa em minha vida.

À minha família, pelo apoio, carinho e compreensão.

Ao orientador Prof. Dr. Deonir Secco, pelo ensinamento, orientação e ajuda. Imprescindível na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Reginaldo Ferreira Santos, Dr. Emerson Vitor Castelani e Dr. Amarildo de Vicente, pela co-orientação, ajuda e sugestões.

A todos os professores do programa, pelo conhecimento adquirido.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, pela oportunidade, apoio e infra-estrutura oferecida.

A Faculdade Assis Gurgacz – FAG, em especial a Cornélio Primieri, por disponibilizar a área experimental.

Ao Moinho Iguaçu – Cascavel – PR, por ceder equipamentos para a realização do experimento.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Aracéli Ciotti de Marins, Daniela Trentin Nava e Gustavo Henrique Dalposo, pela ajuda e apoio.

Ao colega de turma do Programa de Pós-Graduação, Helton Aparecido Rosa, pela importante ajuda na realização deste trabalho.

Aos acadêmicos do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em especial ao veterano Gustavo Veloso, pela ajuda durante o desenvolvimento do experimento.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ANEXOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. CAPÍTULO I – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (<i>Crambe abyssinica</i> Hochst)	2
Resumo	2
Abstract	2
2.1 Introdução	3
2.2 Material e Métodos	4
2.3 Resultados e Discussões	7
2.4 Conclusões	13
3. CAPÍTULO II – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (<i>Crambe abyssinica</i> Hochst).....	14
Resumo	14
Abstract	14
3.1 Introdução	15
3.2 Material e Métodos	16
3.3 Resultados e Discussões	19
3.4 Conclusões	23
4. CONCLUSÕES GERAIS.....	24
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst).

Tabela 1 – Atributos químicos da área experimental04

Tabela 2 – Análise descritiva da resistência do solo à penetração (MPa) e densidade do solo (Mg m^{-3}) nas camadas de 0-0.1m (RSP1 e Ds1), 0.1-0.2m (RSP2 e Ds2), 0.2-0.3m (RSP3 e Ds3) e produtividade do cultura do Crambe (Mg ha^{-1}).....08

Tabela 3 – Parâmetros dos semivariogramas escolhidos através da validação cruzada09

CAPÍTULO II – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst).

Tabela 1 – Análise descritiva pH água (1:1), MO (m/v), P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Pd (Mg ha^{-1})19

Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas escolhidos através da validação cruzada20

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst).

Figura 1 – Grid experimental 05

Figura 2 – Mapas temáticos da resistência do solo à penetração (MPa) e densidade do solo (Mg m^{-3}) nas camadas de 0-0,1m (Ds1 e RSP1), 0,1-0,2m (Ds2 e RSP2) e 0,2-0,3m (Ds3 e RSP3) 10

Figura 3 – Mapa temático da produtividade da cultura do crambe (Mg ha^{-1}) 11

CAPÍTULO II – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst).

Figura 1 – Grid experimental 17

Figura 2 – Mapas temáticos pH água (1:1), MO (m/v), P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Pd (Mg ha^{-1}) 21

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Semivariogramas dos atributos físicos, químicos e da produtividade escolhidos através da validação cruzada	30
--	----

RESUMO

VIEIRA, Maycon Daniel M. Sc., Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Julho – 2012. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um Latossolo argiloso correlacionados ao rendimento de grãos da cultura do Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst).** Orientador: Dr. Deonir Secco; Co-orientador: Dr. Reginaldo Ferreira Santos; Co-orientador: Dr. Emerson Vitor Castelani.

O objetivo deste trabalho foi verificar, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem, a existência de correlação de atributos físicos e químicos com a produtividade da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) em Latossolo argiloso sob sistema de plantio direto. Para tanto, conduziu-se a pesquisa em área experimental localizada na cidade de Cascavel – Paraná – Brasil. O grid experimental foi estabelecido em área com dimensões de 100 x 100m, marcado a cada 10m em duas direções perpendiculares entre si, totalizando 100 pontos, onde foram coletadas amostras de densidade e resistência do solo à penetração nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3m, amostras parcialmente deformadas do solo para determinar o pH, MO, P e K, bem como amostras para determinação da produtividade da cultura do crambe. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, sendo que a análise geoestatística foi realizada utilizando o pacote GeoR. Para a elaboração dos semivariogramas experimentais foram utilizados os estimadores de Matheron e Cressie & Hawkins e para ajustes dos semivariogramas teóricos foram utilizados os métodos dos mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados ponderados. Os modelos teóricos ajustados foram o esférico e exponencial, sendo que a escolha do melhor modelo foi realizada por meio da validação cruzada. Os resultados mostraram que houve correlação fraca entre os mapas temáticos de atributos físicos e químicos do solo com o da produtividade da cultura do crambe. Os mapas RSP1 e pH foram os que apresentaram maior correlação com a produtividade. Os atributos químicos apresentaram maior correlação com melhores níveis de produtividade para valores de $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmolc dm}^{-3}$.

PALAVRAS-CHAVE: geoestatística, culturas energéticas, mapas temáticos.

ABSTRACT

VIEIRA, Maycon Daniel M. Sc., State University of Paraná - UNIOESTE, July - 2012. **Spatial variability of physical and chemical attributes of a clayey oxisol correlated to grain yield of crop Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst).** Mastermind: Dr. Deonir Secco; Co-advisor: Dr. Reginaldo Ferreira Santos; Co-advisor: Dr. Emerson Vitor Castelani.

The objective of this study was to verify, with the help of thematic maps obtained by kriging, the existence of correlation of physical and chemical attributes with the yield of crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) in clayey Oxisol under no-tillage system. To this end, we conducted research in an experimental area in the city of Cascavel - Paraná - Brazil. The experimental grid was established in an area with dimensions of 100 x 100m, marked every 10m in two directions perpendicular to one another, totaling 100 points, samples were collected for bulk density and soil resistance to penetration depths of 0-0,1, 0,1-0,2 and 0,2-0,3m, partially deformed samples to determine soil pH, MO, P and K as well as samples for determining the yield of the crambe. Statistical analyzes were performed using the software R, and the geostatistical analysis was performed using the package GeoR. In developing the experimental semivariograms were used estimators Matheron and Cressie & Hawkins and adjustments of the theoretical semivariogram methods were used ordinary least squares and weighted least squares. Theoretical models have been adjusted and the spherical exponential, and the choice of the best model has been performed by means of cross-validation. The results showed a weak correlation between the thematic maps of physical and chemical properties of soil with the crop yield of crambe. The maps RSP1 and pH showed the highest correlation with yield. Chemical characteristics showed higher correlation with higher levels of productivity at $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ and $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

KEYWORDS: geostatistics, energy crops, thematic maps.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é uma oleaginosa pertencente à família das brassicáceas e nativa da zona do mediterrâneo, destacando-se com grande potencial para a produção de óleo destinado à fabricação do biodiesel. Sendo uma cultura com ciclo de aproximadamente 90 dias, tolerante à seca, baixas temperaturas e geadas, torna-se uma opção para a rotação de culturas.

Cada área de cultivo pode apresentar variações dos atributos físicos e químicos do solo, fazendo-se importante a análise da variabilidade espacial destes atributos para verificar sua correlação com a produtividade. Tal variabilidade pode ser estudada através de técnicas geoestatísticas baseadas na “teoria das variáveis regionalizadas”, que tem por base, a verificação da condição de existência da variabilidade espacial por meio do semivariograma.

Com a utilização da geoestatística é possível estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreva a variabilidade espacial dos dados, tornando possível a geração de mapas através da krigagem. Para Motomiya *et al.* (2006) a krigagem ordinária, método de interpolação de dados, utiliza a dependência espacial entre amostras próximas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do espaço analisado, ao qual o modelo do semivariograma foi ajustado, sem tendência e com variância mínima.

O estimador de Matheron é bastante utilizado na elaboração do semivariograma experimental, já o estimador de Cressie e Hawkins fornece uma estimativa de semivariograma razoavelmente robusta e estável, mesmo nos casos em que há discrepância entre os dados em relação à distribuição normal (FARACO *et al.*, 2008). Devido à grande diversidade de modelos e métodos de ajustes de semivariogramas, sua escolha pode ser realizada através da utilização da validação cruzada. Após escolhido o modelo do semivariograma, este fornece os parâmetros necessários para o método da krigagem, no qual os pesos são atribuídos de acordo com a variabilidade espacial definida no semivariograma (OLIVER e WEBSTER, 1990).

O objetivo deste trabalho foi verificar, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem ordinária, a existência de correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade da cultura do crambe.

2. CAPÍTULO I

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst)

Resumo: O objetivo deste trabalho foi verificar, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem, a existência de correlação da densidade e resistência do solo à penetração com a produtividade da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) em um Latossolo argiloso sob sistema de plantio direto. Para tanto, conduziu-se a pesquisa em uma área experimental localizada na cidade de Cascavel – Paraná – Brasil, situada nas coordenadas 24°56'24"S e 53°30'42"W, com 674m de altura. O grid experimental foi estabelecido em área com dimensões de 100 x 100m, marcado a cada 10m em duas direções perpendiculares entre si, totalizando 100 pontos, onde foram coletadas amostras de densidade e resistência do solo à penetração nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3m, bem como determinou-se a produtividade da cultura do Crambe. As análises foram realizadas com auxílio do software R, sendo que a análise geoestatística foi realizada utilizando o pacote GeoR. Para a elaboração dos semivariogramas experimentais foram utilizados os estimadores de Matheron e Cressie & Hawkins e para os ajustes dos semivariogramas teóricos foram utilizados os métodos dos mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados ponderados. Os modelos teóricos ajustados foram o esférico e exponencial, sendo que a escolha do melhor modelo foi realizada por meio da validação cruzada. Os resultados mostraram que densidade e resistência do solo à penetração em todas as camadas estudadas, não apresentaram valores indicativos de áreas compactadas. Constatou-se correlação fraca da densidade e resistência do solo à penetração com a produtividade da cultura do crambe. Dentre os atributos estudados, a resistência do solo à penetração na camada de 0-0,10m foi a que apresentou maior correlação com a produtividade.

Palavras-chave: geoestatística, culturas energéticas, mapas temáticos.

SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF A CLAYEY OXISOL CORRELATED TO YIELD THE CULTURE OF CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst)

Abstract: The objective of this study was to verify, with the help of thematic maps obtained by kriging, the existence of relationship between density and soil resistance to penetration with the yield of crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) in a clayey oxisol under system tillage. To this end, we conducted research on an experimental area located in the city of Cascavel - Paraná - Brazil, located at coordinates 24°56'24"S and 53°30'42"W, 674m high. The experimental grid was established in an area with dimensions of 100 x 100m, marked every 10m in two directions perpendicular to one another, totaling 100 points, samples were collected for bulk density and soil resistance to penetration depths of 0-0,1, 0,1-0,2 and 0,2-0,3m, and it was determined the yield of crambe. Analyses were performed using the

software R, and the geostatistical analysis was performed using the package GeoR. In developing the experimental semivariograms were used estimators Matheron and Cressie & Hawkins and adjustments of the theoretical semivariogram methods were used ordinary least squares and weighted least squares. Theoretical models have been adjusted and the spherical exponential, and the choice of the best model has been performed by means of cross-validation. The results showed that density and soil resistance to penetration in all layers, not present values indicative of compacted areas. It was found weak correlation between the density and soil resistance to penetration with the yield of crambe. Among the attributes studied, resistance to penetration in the 0-0,10m layer showed the highest relationship with productivity.

Keywords: geostatistics, energy crops, thematic maps.

2.1. Introdução

Com relação aos atributos físicos do solo, cada cultura apresenta particularidades ou necessidades que, durante o cultivo, poderão refletir em maiores níveis de produtividade. Na cultura do crambe as condições de camada de solo sub-superficial (0,2-0,4m) são fundamentais para o desenvolvimento do seu sistema radicular, fazendo com que aumente a possibilidade de tolerar períodos de seca prolongados FUNDAÇÃO MS (2011).

O bom desenvolvimento das raízes depende, entre outros fatores, das condições físico-hídricas do solo. Segundo estudo realizado por Bonini *et al.* (2011), sobre atributos físico-hídricos de Latossolo relacionado com a produtividade de trigo, verificaram a diminuição da produtividade em consequência da alteração do estado estrutural do solo, que ocorreu com aumento da densidade e redução do volume de macroporos, atributos estes considerados importantes para a definição de resistência do solo à penetração, infiltração de água e trocas gasosas. Nesta perspectiva, Abreu *et al.* (2004) destacam a importância da determinação da densidade e porosidade na identificação de camadas compactadas, destacando ainda, que a determinação da resistência do solo à penetração pode ser um forte indicador da qualidade física do solo para estas camadas.

Para Silva (2003), a compactação é um processo complexo que envolve propriedades do solo e resposta das plantas, sendo que, a produtividade das plantas com relação ao nível de compactação apresenta diferentes resultados para diferentes culturas. Neste sentido, um estudo mais aprofundado das características

físicas do solo relacionado à produtividade da cultura do crambe, torna-se indispensável ao desenvolvimento e difusão desta cultura.

Cada área de cultivo pode apresentar variações dos atributos físico-químicos do solo e da produtividade. Para Kitamura *et al.* (2007), o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é ferramenta indispensável para o conhecimento do solo e do manejo a ser adotado nas áreas cultivadas.

O objetivo deste estudo foi de verificar a existência de correlação da densidade e resistência do solo à penetração com a produtividade da cultura do crambe, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem ordinária, em Latossolo argiloso sob sistema de plantio direto.

2.2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido de 04/2011 a 09/2011, em área pertencente à Faculdade Assis Gurgacz, localizada na cidade de Cascavel – Paraná – Brasil. A área em estudo está situada nas coordenadas 24°56'24"S e 53°30'42"W, com 674m de altura. A precipitação e temperatura médias anuais são, respectivamente de 1,640mm e 19°C. O clima local é temperado mesotérmico e super úmido, Cfa (Köppen). O solo da área estudada foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho Distroférico típico, textura argilosa a muito argilosa (600g kg⁻¹ de argila; 320g kg⁻¹ de silte e 80g kg⁻¹ de areia), substrato basalto e relevo ondulado suave, de acordo com EMBRAPA (2006). A análise química do solo foi realizada pelo Laboratório de Análises Químicas do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos químicos da área experimental

Diagnóstico para acidez e calagem								
pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		Índice SMP
	-----cmol _c dm ⁻³ -----					Al	Bases	
4,9	6,3	1,6	0,2	6,5	8,4	2,5	56,2	5,6

Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S								
% MO	% Argila	Textura	S	P- Mehlich	P-resina	K	CTC pH7	K
-----m/v-----			-----mg dm ⁻³ -----			----- cmol _c dm ⁻³ -----		mg dm ⁻³
4,7	60,5	3,0	-X-	13,2	-X-	0,3	14,7	133,0

A área na qual foi estabelecida a pesquisa vem sendo utilizada em rotação de culturas sob sistema de plantio direto (SPD) por dez anos com as culturas de soja, milho, trigo e aveia. A semeadura ocorreu no final do mês de maio e o ciclo da cultura entendeu-se até início de setembro completando aproximadamente 110 dias.

A semente de crambe utilizada foi da cultivar FMS Brilhante, produzida em Mato Grosso do Sul, sendo utilizado espaçamento entre linhas de 0,21m e densidade de 30 sementes por metro de linha de semeadura.

Para a instalação do grid experimental, Figura 1, selecionou-se uma área com dimensões de 100 x 100m, marcado a cada 10m com auxílio de GPS Garmim modelo 60CSx, em duas direções perpendiculares entre si, totalizando 100 pontos. Em cada ponto fez-se as coletas de resistência do solo à penetração (RSP), densidade do solo (Ds) e produtividade (Pd). A RSP (MPa) foi medida com auxílio de um penetrômetro modelo *penetroLOG digital PLG1020* da marca *Falker - Solo Star*, acoplado a um quadriciclo, obtendo amostras até profundidade de 0,3m, sendo utilizado a média de cinco repetições em cada ponto georreferenciado. Posteriormente calculou-se o índice de cone nas camadas de: 0-0,1 (RSP1), 0,1-0,2 (RSP2) e 0,2-0,3m (RSP3). As amostras de Ds (Mg m^{-3}) foram coletadas em cada ponto georreferenciado através do método do anel volumétrico, nas camadas de 0-0,1 (Ds1), 0,1-0,2 (Ds2) e 0,2-0,3m (Ds3). Para análise da produtividade (Mg ha^{-1}) coletou-se uma área de 4m^2 em cada ponto georreferenciado e corrigiu-se a umidade dos grãos à 13%.

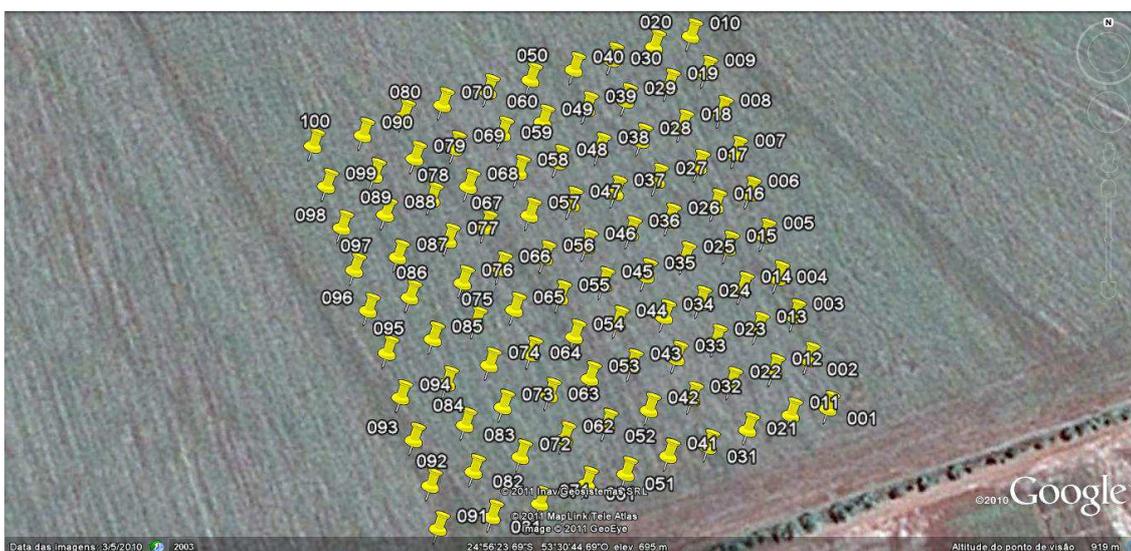


Figura 1 – Grid experimental.

Com o objetivo de identificar o comportamento inicial dos dados realizou-se uma análise descritiva utilizando o software R (R Development Core Team, 2009), e para investigar se os dados apresentam distribuição normal realizou-se o teste de normalidade de *Anderson Darling*. Para análise geoestatística utilizou-se o pacote GeoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001), sendo que, para a estimação da estrutura de dependência espacial dos dados utilizou-se o estimador de Matheron, Equação (1), nos casos em que os dados apresentaram distribuição normal, e o estimador de Cressie e Hawkins, Equação (2), nos casos em que os dados não apresentaram distribuição normal, pois segundo Faraco *et al.* (2008), o estimador de Matheron é estável em casos de normalidade dos dados e pouco resistente nos casos de dados atípicos (*outliers*), sendo neste caso, indicado o uso do estimador de Cressie & Hawkins. As semivariâncias foram calculadas utilizando um *cutoff* de 50% da distância máxima (CLARK, 1979).

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

$$\hat{\gamma}_c(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z(S_i) - Z(S_i + h)|^{\frac{1}{2}} \right\}^4}{0,914 + \frac{0,988}{N(h)}} \quad (2)$$

Os métodos utilizados para o ajuste do semivariograma teórico ao experimental foram o dos mínimos quadrados ordinários (OLS) e dos mínimos quadrados ponderados (WLS), e os modelos ajustados foram o exponencial e esférico. Para avaliar o ajuste ao semivariograma experimental, utilizou-se a validação cruzada, uma técnica que permite comparar os valores previstos com os amostrados (ISAACS e SRISVASTAVA, 1989), sendo que o erro médio (EM) e erro médio reduzido (ER) devem ser mais próximo a zero, o desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) deve ser mais próximo a 1 (um) e o erro absoluto (EA) é uma medida da magnitude dos erros na unidade da variável regionalizada (MELLO, 2004). As Equações (3) a (6) representam estas informações.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(S_i) - \hat{Z}(S_i)) \quad (3)$$

$$ER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(S_i) - \hat{Z}(S_i)}{\sigma(\hat{Z}(S_i))} \quad (4)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(S_i) - \hat{Z}(S_i)|}{\sigma(\hat{Z}(S_i))}} \quad (5)$$

$$EA = \sum_{i=1}^n |\hat{Z}(S_i) - Z(S_i)| \quad (6)$$

Realizou-se uma avaliação quantitativa da variabilidade espacial utilizando o “coeficiente efeito pepita” (E_o), sendo este, o percentual entre o efeito pepita (ϕ_1) e o patamar ($\phi_1 + \phi_2$), ou seja, $\phi_1 / (\phi_1 + \phi_2)$. Sendo que, quanto menor este coeficiente maior é a variabilidade espacial. Segundo Cambardella *et al.* (1994), modelos apresentam forte dependência espacial com $E_o \leq 25\%$ e moderada dependência espacial com $25\% < E_o \leq 75\%$. Após a escolha do modelo utilizou-se a krigagem ordinária para obter os mapas temáticos da RSP e Ds nas três profundidades analisadas (0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3m) e o mapa da produtividade.

2.3. Resultados e Discussões

Os dados descritivos iniciais dos atributos físicos do solo (resistência do solo à penetração e densidade), bem como da produtividade, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Análise descritiva da resistência do solo à penetração (MPa) e densidade do solo (Mg m^{-3}) nas camadas de 0-0,1m (RSP1 e Ds1), 0,1-0,2m (RSP2 e Ds2), 0,2-0,3m (RSP3 e Ds3) e produtividade do cultura do Crambe (Mg ha^{-1})

Atributo	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.	Desvio Padrão	CV(%)	p-valor*
Resistência do Solo à Penetração									
RSP1	0,54	1,03	1,23	1,21	1,39	1,98	0,29	23,8	0,9779
RSP2	1,46	1,87	2,12	2,21	2,46	4,02	0,45	20,4	0,0059
RSP3	1,12	1,55	1,76	1,84	2,04	3,06	0,40	22,0	0,0003
Densidade									
Ds1	0,92	1,02	1,08	1,07	1,12	1,22	0,06	5,8	0,1592
Ds2	0,90	1,04	1,08	1,08	1,11	1,19	0,05	5,2	0,5059
Ds3	0,86	0,98	1,02	1,03	1,07	1,22	0,06	6,3	0,0772
Produtividade									
Pd	0,09	0,29	0,37	0,38	0,47	0,88	0,15	40,6	0,0004

*Teste de normalidade de *Anderson-Darling*. Considera-se normal a distribuição que apresentar p-valor maior que 0,05. Ug (0-0,1m): 36,9; Ug (0,1-0,2m): 38,1; Ug (0,2-0,3m): 40,1.

Para Pimentel Gomes e Garcia (2002), a variabilidade dos atributos físicos pode ser classificado conforme os valores de seus coeficientes de variação (CV), sendo baixa ($CV < 10\%$), média ($10\% \leq CV < 20\%$), alta ($20\% \leq CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$). Analisando os valores de RSP1, RSP2 e RSP3 na Tabela 2, observa-se que todas as camadas do solo apresentaram variabilidade considerada alta ($20\% \leq CV \leq 30\%$), o que está de acordo com Faraco *et al.* (2008) que, ao realizar estudo em Latossolo Vermelho distroférico, encontraram valores para o coeficiente de variação da RSP entre alto e médio. Com relação ao teste *Anderson-Darling* para os conjuntos de RSP, apenas RSP1 apresentou normalidade nos dados, ou seja, $p \geq 0,05$.

Para Ds1, Ds2 e Ds3 constatou-se que em todas as camadas houve normalidade nos dados e os valores de CV ficaram abaixo de 10%, considerado como baixa variabilidade, havendo também homogeneidade entre os valores da média e mediana de Ds1 e Ds2, demonstrando que a densidade entre estas camadas não obtiveram grandes variações, o que também já foi constatado por Cavallini *et al.* (2010).

Já os dados de Pd apresentaram coeficiente de variação considerado muito alto, com $CV \geq 40\%$, com dados produtivos variando de 0,09 a 0,88 Mg ha^{-1} e com média de 0,38 Mg ha^{-1} , valor inferior ao encontrado por Pitol (2008) em que, sob boas condições de solo e fertilidade, destaca que tal produtividade pode variar de 1,0 a 1,5 Mg ha^{-1} . Devido ao fato do solo não apresentar valores de atributos físicos

considerados críticos para este tipo solo (REICHERT, 2003), a provável explicação para a baixa produtividade pode estar mais relacionado com a acidez do solo, com valores de pH em 4,9 e apresentando quantidades de Al em $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 1).

Para elaboração dos semivariogramas experimentais de RSP1, DS1, DS2 e DS3 utilizou-se o estimador de Matheron, pelo fato destes dados apresentarem distribuição normal. Para as outras variáveis monitoradas, o estimador utilizado foi o de Cressie e Hawkins pelo fato deste ser um estimador mais robusto e estável mesmo no caso de dados atípicos.

A Tabela 3 apresenta os modelos teóricos ajustados que foram escolhidos através da validação cruzada e a avaliação quantitativa da variabilidade espacial, onde quanto menor o valor de E_o maior é a dependência espacial (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

Tabela 3 – Parâmetros dos semivariogramas escolhidos através da validação cruzada*

Atributo	Modelo	Método	ϕ_1	ϕ_2	a	$\phi_1 + \phi_2$	$E_o(\%)$
RSP1	Exp.	OLS	0,0442	0,0536	128,81	0,0978	45
RSP2	Esf.	OLS	0,0643	0,1757	98,00	0,2400	27
RSP3	Esf.	WLS	0,0968	0,0706	97,99	0,1674	58
Ds1	Exp.	WLS	0,0028	0,0011	41,94	0,0039	72
Ds2	Esf.	WLS	0,0026	0,0005	64,00	0,0031	84
Ds3	Exp.	OLS	0,0028	0,0024	128,81	0,0052	54
Pd	Exp.	OLS	0,0001	0,0237	50,92	0,0238	0,42

*OLS: mínimos quadrados ordinários, WLS: mínimos quadrados ponderados Exp.: Exponencial, Esf.: Esférico. ϕ_1 : efeito pepita, ϕ_2 : contribuição, $\phi_1 + \phi_2$: patamar, a: alcance, E_o : coeficiente do efeito pepita.

Todos os atributos da Tabela 3, exceto Ds2 e Pd, apresentaram moderada dependência espacial ($25 \leq E_o \leq 75$). Ds1, Ds2 e Ds3, apresentaram os menores valores para o EA, possivelmente pelo fato de apresentarem uma distribuição normal dos dados e não haver grande variação nos valores da Ds.

Os mapas temáticos obtidos pela interpolação por krigagem ordinária são apresentados na Figura 2.

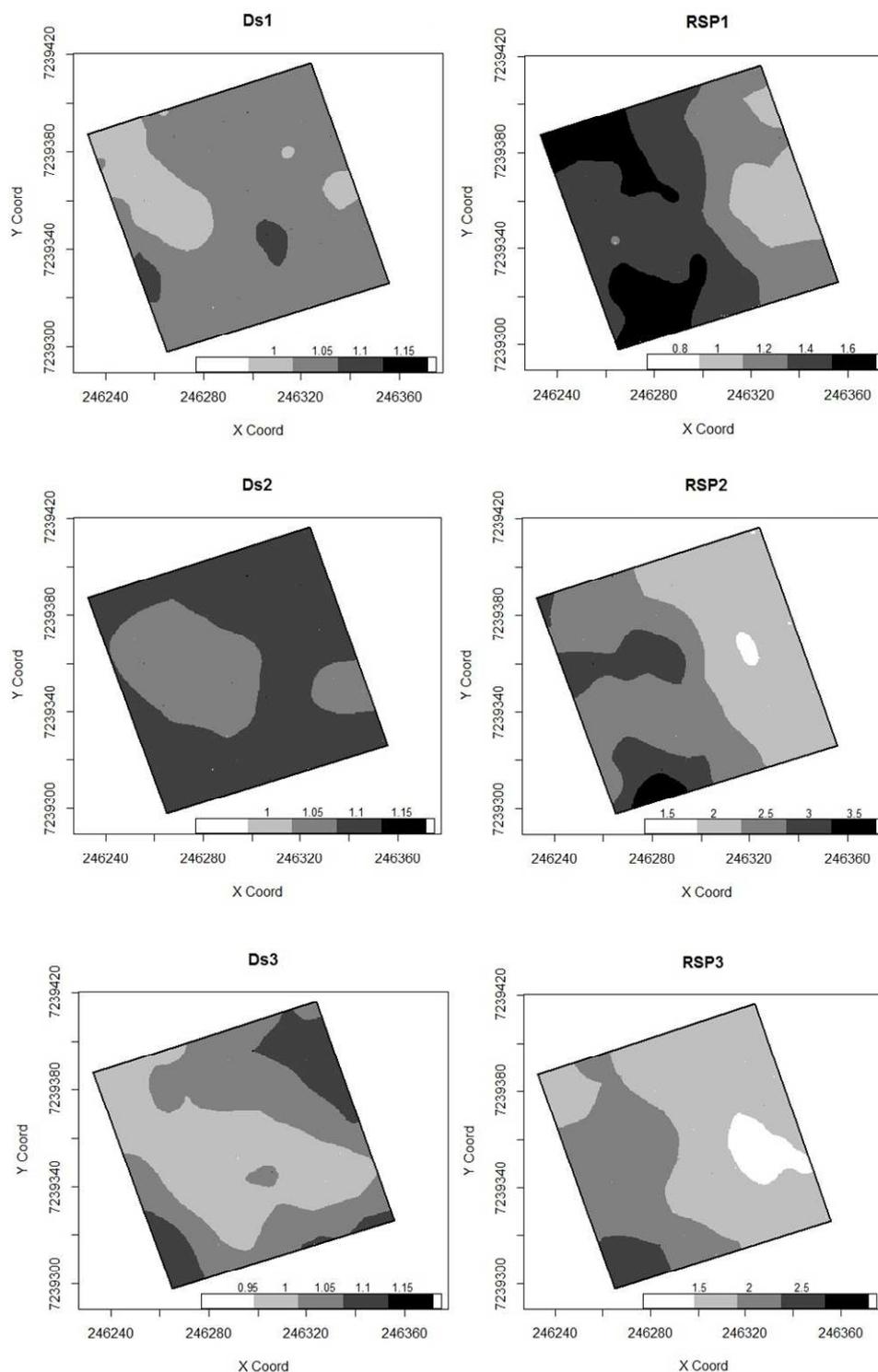


Figura 2 – Mapas temáticos da resistência do solo à penetração (MPa) e densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) nas camadas de 0-0,1m (Ds1 e RSP1), 0,1-0,2m (Ds2 e RSP2) e 0,2-0,3m (Ds3 e RSP3). U_g (0-0,1m): 36,9%; U_g (0,1-0,2m): 38,1%; U_g (0,2-0,3m): 40,1%. Cores escuras representam valores maiores e cores claras valores menores. Y Coord: Norte e Sul (UTM); X Coord: Leste e Oeste (UTM).

Observando os mapas temáticos Ds1, Ds2 e Ds3, Figura 2, nota-se que em grande parte dos mapas os valores de Ds foram inferiores a $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ nas três camadas do solo, sendo que menores valores para Ds foram constatados na área central e superior esquerda dos mapas.

Com relação a RSP1, RSP2 e RSP3, Figura 2, visualiza-se comportamento semelhante dos três mapas, com concentração de maior e menor valores para RSP, respectivamente, na área esquerda e direita dos mapas, com valores variando de 1,0 à 3,5 MPa.

Nota-se também, que em RSP2 houve um aumento nos valores da RSP quando comparado aos valores de RSP1 e RSP3, visto que, o solo na camada de 0,1-0,2m é mais suscetível à compactação nos sistemas de plantio direto, devido, principalmente, ao tráfego intenso de máquinas agrícolas, o que está de acordo com Secco *et al.* (2009) que, em estudo sobre atributos físicos do solo em áreas compactadas de Latossolos cultivados sob plantio direto, verificaram que os maiores valores de RSP e Ds encontraram-se na camada de 0,07-0,12m.

Considerando os mapas temáticos Ds2 e RSP2, onde em grande parte dos mapas os valores de Ds foram inferiores à $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ e RSP ficaram entre 1,5 e 2,5 MPa, constata-se que não ocorreram fortes indícios de áreas compactadas para esta profundidade, pois segundo Reichert *et al.* (2003, 2008), para solos com textura argilosa, somente valores de resistência do solo à penetração acima de 2 MPa, densidade acima de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ e volume de macroporos inferiores a 10%, podem ser indícios de camadas compactadas.

O mapa temático da produtividade é apresentado na Figura 3.

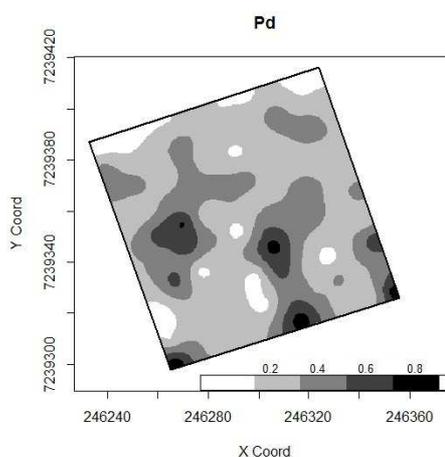


Figura 3 – Mapa temático da produtividade da cultura do Crambe (Mg ha^{-1}). Cores escuras representam valores maiores e cores claras valores menores. Y Coord: Norte e Sul (UTM); X Coord: Leste e Oeste (UTM).

Correlacionando os mapas temáticos RSP1 e Ds1 com Pd, figuras 2 e 3, referente à profundidade do solo de 0-0,1m, nota-se uma maior correlação entre Ds1 e Pd apenas na região central esquerda do mapas, onde valores de $Ds \leq 1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ corresponderam a níveis maiores de produtividade. Já para RSP1 e Pd nota-se maior correlação nas áreas inferior e superior esquerda dos mapas, onde valores da $RSP \geq 1,6 \text{ MPa}$ corresponderam a valores de $Pd \leq 0,4 \text{ Mg m}^{-3}$. Mesmo tratando-se de culturas diferentes, podemos levar em consideração que Johann *et al.* (2004), em estudo sobre variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo argiloso relacionado a produtividade da soja, constataram que dentre os atributos estudados a resistência do solo à penetração na camada de 0-0,1m, foi a variável que melhor de relacionou com a produtividade. Para Carvalho *et al.* (2006), em estudo sobre a resistência do solo a penetração e produtividade do feijão em um sistema sob plantio direto, não encontraram correlação linear nem espacial entre RSP e produtividade de grão de feijão.

Secco *et al.* (2005), em estudo sobre produtividade e propriedades físicas de um Latossolo, concluíram que o nível de compactação existente com $RSP \leq 2,6 \text{ MPa}$, $Ug = 0,27 \text{ kg kg}^{-1}$, $Ds \leq 1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ e volume de Macro $\geq 10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, em condições de lavoura, não comprometeu significativamente o rendimento de grãos da cultura da soja. Neste sentido, correlacionando RSP2, Ds2, RSP3 e Ds3 com a produtividade, nota-se correlação em regiões onde ocorreram maiores níveis de produtividade ($0,6 \leq Pd \leq 0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) correspondendo a regiões com $Ds \leq 1,1 \text{ Mg m}^{-3}$ e $RSP \leq 3,0 \text{ MPa}$. Em pesquisa realizada em um Latossolo Vermelho submetido a preparo convencional, na profundidade de 0,2-0,4m, Freddi *et al.* (2006) constataram que a produtividade do milho não apresentou correlação espacial com a resistência do solo à penetração e nem tampouco foi afetada para valores de RSP inferiores a 2 MPa.

De uma maneira geral os mapas temáticos dos atributos físicos, em ambas as profundidades estudadas, apresentaram correlação fraca com a produtividade, o que talvez esteja relacionado ao fato do solo não apresentar características para áreas compactadas nem apresentar variações significativas para a densidade do solo, ou ainda, o fato desta cultura não ser afetada com os níveis de RSP e Ds constatados na pesquisa. Também se deve levar em consideração que outros fatores, como as

características químicas do solo, podem estar mais correlacionados com a variabilidade espacial da produtividade do crambe.

2.4. Conclusões

- i. Os mapas de densidade e resistência do solo à penetração, nas três camadas estudadas, não apresentaram fortes indícios de compactação do solo;
- ii. Os mapas temáticos dos atributos de densidade e resistência do solo à penetração apresentaram fraca correlação com a produtividade da cultura do crambe.
- iii. Dentre os mapas temáticos dos atributos físicos, o referente à camada do solo de 0-0,10m foi o que apresentou maior correlação com a produtividade da cultura do crambe.

3. CAPÍTULO II

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO CORRELACIONADOS AO RENDIMENTO DE GRÃOS DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst)

Resumo: O objetivo deste trabalho foi verificar, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem, a existência de correlação entre atributos químicos do solo com a produtividade da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) em Latossolo argiloso sob sistema de plantio direto. Para tanto, conduziu-se a pesquisa em uma área experimental localizada na cidade de Cascavel – Paraná – Brasil, situada na coordenadas 24°56'24"S e 53°30'42"W, com 674m de altura. A semente utilizada foi a cultivar FMS Brilhante, com espaçamento entre linhas de 0,21m e densidade de 30 sementes por metro de linha de semeadura, com ciclo da cultura de aproximadamente 110 dias. O grid experimental foi estabelecido em uma área com dimensões de 100 x 100m, marcado a cada 10m em duas direções perpendiculares entre si, totalizando 100 pontos, onde foram coletadas amostras parcialmente deformadas do solo para determinar o pH, MO, P e K, bem como da produtividade da cultura do Crambe. A análise química do solo foi realizada pelo Laboratório de Análises Químicas do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Posteriormente, para a análise estatística, utilizou-se o software R e, para a análise geoestatística o pacote GeoR. Para a elaboração dos semivariogramas experimentais foi utilizado o estimador Cressie & Hawkins e para os ajustes dos semivariogramas teóricos foram utilizados os métodos dos mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados ponderados. Os modelos teóricos ajustados foram o esférico e exponencial, sendo que a escolha do melhor modelo foi realizada por meio da validação cruzada. Após a escolha do modelo utilizou-se a krigagem ordinária para obter os mapas temáticos de pH, MO, P, K e o mapa da produtividade. Os resultados mostraram que houve fraca correlação dos mapas temáticos de atributos químicos com o da produtividade da cultura do crambe. Dentre os atributos químicos, pH apresentou maior correlação com a produtividade. Os mapas temáticos pH, MO, P e K apresentaram correlação com melhores índices de produtividade para valores de $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Palavras-chave: geoestatística, culturas energéticas mapas temáticos.

SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL ATTRIBUTES OF A CLAYEY OXISOL CORRELATED TO YIELD THE CULTURE OF CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst)

Abstract: The objective of this study was to verify, with the help of thematic maps obtained by kriging, the existence of relationship between soil chemical properties with the yield of crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) in clayey Oxisol under no-tillage system. To this end, we conducted research on an experimental area located in the city of Cascavel - Paraná - Brazil, located at coordinates 24°56'24"S and 53°30'42"W, 674m high. The seed was used to cultivate FMS Bright, with line spacing 0,21m,

density of 30 seeds per meter row sowing with the crop cycle of about 110 days. The experimental grid was established in an area with dimensions of 100 x 100m, marked every 10m in two directions perpendicular to one another, totaling 100 points, which were partially deformed samples collected to determine soil pH, MO, P and K as well as the yield of the Crambe. The soil chemical analysis was performed by the Laboratory of Soil Chemical Analysis, Department of Soil Science, Federal University of Santa Maria. Later, for the statistical analysis, we used the software R, and for geostatistical analysis package GeoR. In developing the experimental semivariogram was used estimator and Cressie & Hawkins adjustments semivariograms theoretical methods were used ordinary least squares and weighted least squares. Theoretical models have been adjusted and the spherical exponential, and the choice of the best model has been performed by means of cross-validation. After choosing the model we used ordinary kriging for the thematic maps of pH, MO, P, K and the map of productivity. The results showed poor correlation of thematic maps of the chemical with the yield of the crambe. Among the chemical, pH had a higher correlation with yield. Thematic maps pH, MO, P and K correlated with better productivity at $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ and $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Key words: geostatistics, energy crops, thematic maps.

3.1. INTRODUÇÃO

Cada área de cultivo pode apresentar diferentes níveis de fertilidade do solo, podendo desta forma, refletir em menores ou maiores níveis de produtividade para diferentes culturas. Neste sentido, o crambe apresenta algumas características importantes, como não tolerar solos ácidos ou com alumínio tóxico e exigir solos eutróficos ou corrigidos para o seu cultivo FUNDAÇÃO MS (2011).

Para Leite *et al.* (2006), tradicionalmente, a calagem tem sido utilizada para melhorar as condições de crescimento e desenvolvimento das plantas, pois além de corrigir a acidez do solo interfere diretamente na toxidez de Al, que restringe o crescimento radicular. Nesta perspectiva, o conhecimento da variação de atributos químicos do solo é importante para seu manejo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas agrícolas (SOARES DE SOUZA LIMA, 2010), refletindo em economia para o produtor.

A amostragem de solo pelo método tradicional, usado para a recomendação de adubação e calagem, não considera as diferenças nos atributos do solo de uma lavoura, já o manejo localizado aumenta a eficiência de uso de insumos e à análise de mapas de rendimento auxiliam nas modificações das práticas de manejo (DURIGON *et al.*, 2009).

Normalmente, as taxas de aplicação de fertilizantes são calculadas tendo como referência valores médios, e a aplicação é realizada de forma homogênea em toda a extensão do campo, porém, este tratamento pode gerar desperdícios econômicos ao produtor, além de danos ambientais (SPAROVEK e SCHNUG, 2001). Sendo assim, o conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode aperfeiçoar a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, melhorando o controle do sistema de produção das culturas (SOUZA *et al.*, 2004).

O objetivo deste estudo foi verificar, com auxílio de mapas temáticos obtidos através da interpolação por krigagem, a existência de correlação dos atributos acidez (pH), matéria orgânica (MO), fósforo (P) e potássio (K) com a produtividade (Pd) da cultura do crambe, em Latossolo argiloso sob sistema de plantio direto.

3.2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido de 04/2011 a 09/2011, em uma área pertencente à Faculdade Assis Gurgacz, localizada na cidade de Cascavel – Paraná – Brasil. A área em estudo está situada na coordenadas 24°56'24"S e 53°30'42"W, com 674m de altura. A precipitação e temperatura médias anuais são, respectivamente de 1,640mm e 19°C. O clima local é temperado mesotérmico e super úmido, Cfa (Köppen). O solo da área estudada foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho Distroférico típico, textura argilosa a muito argilosa (600g kg⁻¹ de argila; silte kg⁻¹ 320g e 80g kg⁻¹ de areia), substrato basalto e relevo ondulado suave, de acordo com EMBRAPA (2006).

A área na qual foi estabelecida a pesquisa vem sendo utilizada em rotação de culturas sob sistema de plantio direto (SPD) por dez anos com as culturas de soja, milho, trigo e aveia. A semeadura ocorreu no final do mês de maio e o ciclo da cultura entendeu-se até início de setembro completando aproximadamente 110 dias. A semente de crambe utilizada foi da cultivar FMS Brilhante, produzida em Mato Grosso do Sul, sendo utilizado espaçamento entre linhas de 0,21m e densidade de 30 sementes por metro de linha de semeadura.

Para a instalação do grid experimental, Figura 2, selecionou-se uma área com dimensões de 100 x 100m, marcado a cada 10m com auxílio de GPS Garmim modelo 60CSx, em duas direções perpendiculares entre si, totalizando 100 pontos.

Foram coletadas amostras parcialmente deformadas do solo para a determinação de pH água (1:1), MO (m/v), P-Mehlich (mg dm^{-3}) e K ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), na profundidade de 0,1m em cada ponto georreferenciado. A análise química foi realizada pelo Laboratório de Análises Químicas do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Para análise da produtividade (Mg ha^{-1}) coletou-se uma área de 4m^2 em cada ponto georreferenciado e corrigiu-se a umidade dos grãos à 13%.

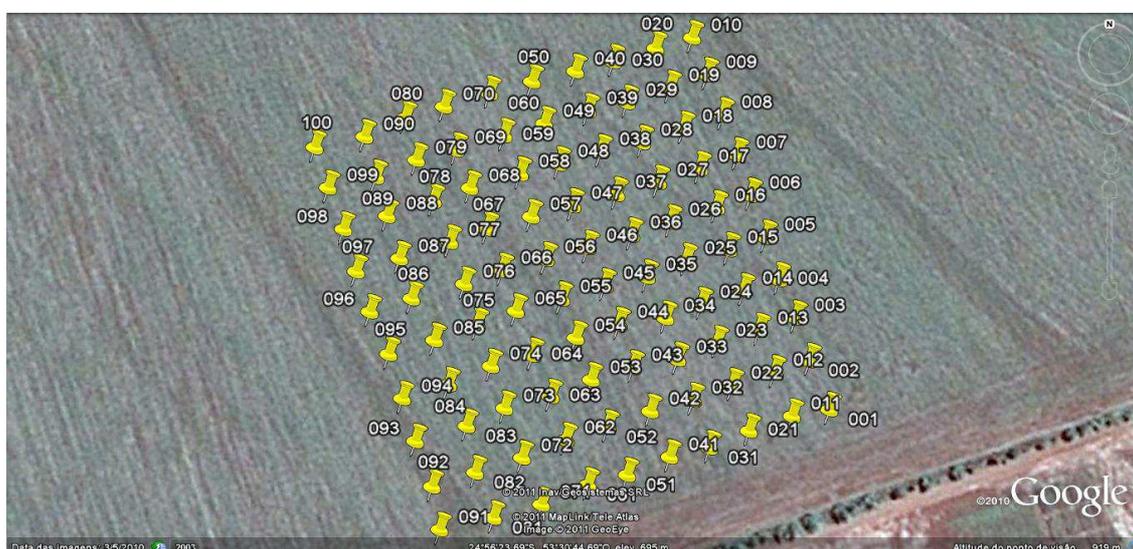


Figura 1 – Grid experimental.

Com o objetivo de identificar o comportamento inicial dos dados realizou-se uma análise descritiva utilizando o software R (R Development Core Team, 2009), e para investigar se os dados apresentam distribuição normal realizou-se o teste de normalidade de *Anderson Darling*, conforme Tabela 1. Na análise geoestatística utilizou-se o pacote GeoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001), sendo que, para a estimação da estrutura de dependência espacial dos dados utilizou-se o estimador de Cressie e Hawkins, Equação (1), pelo fato da maioria dos dados não apresentarem distribuição normal, pois, segundo Faraco (2008), o estimador de Cressie e Hawkins é mais resistente mesmo no caso de dados atípicos (*outliers*). As semivariâncias foram calculadas utilizando um *cutoff* de 50% da distância máxima (CLARK, 1979).

$$\hat{\gamma}_c(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z(S_i) - Z(S_i + h)|^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{0,914 + \frac{0,988}{N(h)}} \quad (1)$$

Os métodos utilizados para o ajuste do semivariograma teórico ao experimental foram o dos mínimos quadrados ordinários (OLS) e dos mínimos quadrados ponderados (WLS), e os modelos ajustados foram o exponencial e esférico. Para avaliar o ajuste ao semivariograma experimental, utilizou-se a validação cruzada, uma técnica que permite comparar os valores previstos com os amostrados (ISAAKS e SRISVASTAVA, 1989), sendo que o erro médio (EM) e erro médio reduzido (ER) devem ser mais próximo a zero, o desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) deve ser mais próximo a 1 (um) e o erro absoluto (EA) é uma medida da magnitude dos erros na unidade da variável regionalizada (MELLO, 2004). As Equações (2) a (5) representam estas informações.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(S_i) - \hat{Z}(S_{(i)})) \quad (2)$$

$$ER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(S_i) - \hat{Z}(S_{(i)})}{\sigma(\hat{Z}(S_{(i)}))} \quad (3)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(S_i) - \hat{Z}(S_{(i)})|}{\sigma(\hat{Z}(S_{(i)}))}} \quad (4)$$

$$EA = \sum_{i=1}^n |\hat{Z}(S_i) - Z(S_{(i)})| \quad (5)$$

Realizou-se uma avaliação quantitativa da variabilidade espacial utilizando o “coeficiente efeito pepita” (E_0), sendo este, o percentual entre o efeito pepita (ϕ_1) e o patamar ($\phi_1 + \phi_2$), ou seja, $\phi_1 / (\phi_1 + \phi_2)$. Sendo que, quanto menor este coeficiente maior é a variabilidade espacial. Segundo Cambardella *et. al.* (1994), modelos

apresentam forte dependência espacial com $E_o \leq 25\%$ e moderada dependência espacial com $25\% < E_o \leq 75\%$. Após a escolha do modelo utilizou-se a krigagem ordinária para obter os mapas temáticos de pH, MO, P, K e o mapa da produtividade (Pd).

3.3. Resultados e Discussões

De acordo com Warrick e Nielsen (1980), os limites do coeficiente de variação para atributos do solo podem ser classificados como: $CV \leq 12\%$ (baixa variabilidade), $12\% < CV < 24\%$ (média variabilidade) e $CV \geq 24\%$ (alta variabilidade).

Os dados descritivos dos atributos químicos do solo: pH, MO, P e K, bem como da Pd, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise descritiva pH água (1:1), MO (m/v), P (mg dm⁻³), K (cmol_c dm⁻³) e Pd (Mg ha⁻¹)

Atributo	Mín.	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máx.	Desvio Padrão	CV (%)	p-valor*
Atributos químicos									
pH	4,40	4,90	5,10	5,05	5,20	5,50	0,20	4,06	0,0070
MO	3,40	4,40	4,60	4,64	5,00	5,80	0,45	9,70	0,1800
P	3,00	7,60	11,80	15,52	18,00	76,00	12,68	81,75	0,2e ⁻¹⁵
K	0,11	0,22	0,30	0,34	0,43	1,07	0,17	50,95	0,2e ⁻⁴
Produtividade									
Pd	0,09	0,29	0,37	0,38	0,47	0,88	0,15	40,67	0,0004

*Teste de normalidade de *Anderson-Darling*. Considera-se normal a distribuição que apresentar p-valor maior que 0,05.

Analisando a Tabela 1, observa-se que os coeficientes de variação do pH e MO apresentaram variabilidade baixa ($CV \leq 12\%$), já P, K e Pd apresentaram variabilidade alta ($CV \geq 24\%$), o que está de acordo com Soares de Souza Lima (2010) e Dalchiavon *et al.* (2012), que também encontraram valores semelhantes para estas variáveis.

Os dados de Pd variaram de 0,09 a 0,88 Mg ha⁻¹, com uma média de 0,38 Mg ha⁻¹, valor inferior ao encontrado por Pitolo (2008) em que, sob boas condições de solo e fertilidade, destaca que tal produtividade pode variar de 1,0 a 1,5 Mg ha⁻¹. A

baixa produtividade pode estar relacionada com a competição da cultura de aveia cultivada anteriormente e aos níveis de pH encontrados na pesquisa, pois segundo Jasper (2009), o crambe se desenvolve melhor em solos com pH entre 6,0 e 7,0.

Devido os dados dos atributos analisados não apresentarem distribuição normal, exceto MO, conforme teste de *Anderson-Darling*, Tabela 1, para elaboração dos semivariogramas experimentais utilizou-se o estimador de Cressie e Hawkins pelo fato deste ser um estimador mais robusto e menos sensível a dados discrepantes (FARACO, 2008).

A Tabela 2 apresenta os modelos teóricos ajustados que foram escolhidos pela validação cruzada e a avaliação quantitativa da variabilidade espacial.

Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas escolhidos através da validação cruzada*

Atributo	Modelo	Método	$\phi 1$	$\phi 2$	a	$\phi 1 + \phi 2$	$E_o(\%)$
pH	Esf.	WLS	0,0180	0,022	40,00	0,040	45
MO	Exp.	OLS	0,0700	0,163	65,90	0,233	30
P	Esf.	WLS	63,5770	26,234	105,51	89,811	71
K	Exp.	WLS	0,0140	0,011	44,93	0,025	56
Pd	Exp.	OLS	0,0001	0,023	50,92	0,023	0,42

*OLS: mínimos quadrados ordinários, WLS: mínimos quadrados ponderados Exp.: Exponencial, Esf.: Esférico. $\phi 1$: efeito pepita, $\phi 2$: contribuição, $\phi 1 + \phi 2$: patamar, a: alcance, E_o : coeficiente do efeito pepita.

Segundo Cambardella *et al.* (1994), quanto menor o valor de E_o maior é a dependência espacial. Sendo assim, na Tabela 2, verificamos MO que apresentou maior dependência espacial entre os atributos analisados, estando de acordo com Silva *et al.* (2001), que em estudo dos atributos K, MO e P em Alissolos na profundidade 0-0,3m, encontraram os maiores níveis de dependência espacial para o atributo MO. Carvalho *et al.* (2003), em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, encontraram valores de E_o que classificaram MO com moderada dependência espacial.

Para o atributo pH, o valor de E_o está próximo do encontrado por Souza *et al.* (2004), que em estudo sobre variabilidade espacial de atributos químicos em um Latossolo Vermelho eutrófico, encontraram valor de 44% para o modelo esférico.

Nos atributos P e K, os valores de E_o estão classificados como moderada dependência espacial, concordando com valores encontrados por Campos (2008). O valor de E_o para a Pd está classificado como de forte dependência espacial ($E_o \leq$

25%), porém não se encontrou na literatura valores de E_0 como referência para a produtividade desta cultura. Os mapas temáticos obtidos pela interpolação por krigagem ordinária das variáveis pH, MO, P, K e Pd são apresentados na Figura 2.

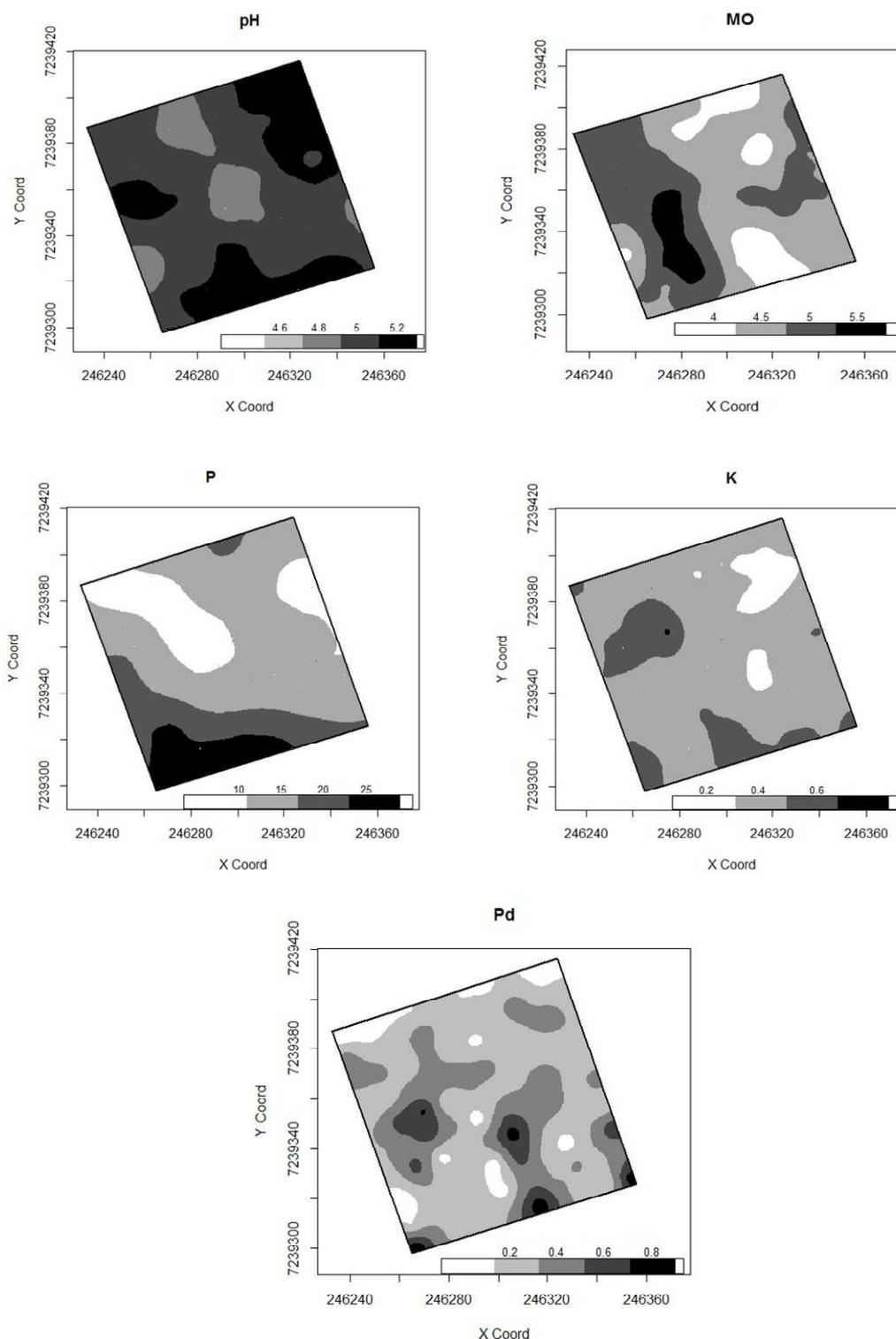


Figura 2 – Mapas temáticos de: pH água (1:1), MO (m/v), P (mg dm^{-3}), K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Pd (Mg ha^{-1}). Cores escuras representam valores maiores e cores claras valores menores. Y Coord: Norte e Sul (UTM); X Coord: Leste e Oeste (UTM).

Correlacionando os mapas temáticos de pH e Pd, Figura 2, nota-se que onde ocorreram níveis $0,6 \leq Pd \leq 0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ corresponderam a regiões com $\text{pH} \geq 5,0$, já regiões de $\text{pH} \leq 4,8$ corresponderam aos menores índices de produtividade ($Pd \leq 0,4 \text{ Mg ha}^{-1}$). Esta tendência dos maiores níveis de produtividade se concentrarem em regiões com pH superior a 5,0 está de acordo com Jasper (2009), de que a cultura do crambe prefere solos com pH entre 6,0 e 7,0. Neste sentido, Soares de Souza Lima (2010), em estudo sobre análise espacial de atributos químicos do solo e produtividade de pimenta-do-reino, cita a importância de se efetuar a correção do solo considerando a variabilidade espacial da acidez para que se tenha uma produção da cultura com potencial desejado e em toda área cultivada.

O mapa temático MO apresentou correlação com Pd apenas para regiões com $\text{MO} \geq 5,5$, onde ocorreram níveis de produtividade $0,2 \leq Pd \leq 0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Nos mapas temáticos P e Pd, nota-se que houve correlação em regiões com $Pd \geq 0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, correspondendo a regiões com $P \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$, o que está de acordo com Lunelli (2012), que constatou um pequeno ganho de rendimento de grãos da cultura do crambe com o incremento da adubação de P.

O mesmo ocorreu com os mapas de K e Pd, onde $Pd \geq 0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, corresponderam a regiões com $K \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, porém sem correlação com demais níveis de produtividade. De acordo com Lunelli (2012) a adubação isolada de K não resultou em maior produtividade de grãos da cultura do crambe em área inicialmente com teores de $1,03 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, porém o arranjo de nitrogênio (N) e K resultaram em aumento de 18,15% da produtividade.

De maneira geral, os mapas temáticos dos atributos químicos apresentaram correlação com a produtividade do crambe, porém de forma fraca, pois houve correlação apenas de alguns níveis em cada mapa (pH, MO, P e K) com a produtividade, o que está de acordo com Dellamea (2008) onde, em estudo sobre eficiência da adubação a taxa variável, encontrou correlação fraca entre atributos químicos e produtividade da soja, citando ainda que diversos outros estudos encontrados na literatura (YANAI et al., 2001; VIEIRA; MOLIN, 2001 e PONTELLI, 2006), descrevem fraca correlação entre fertilidade do solo e produtividade desta cultura.

O fato de não haver alta correlação entre os mapas dos atributos químicos com o da produtividade, pode estar relacionado com o fato da cultura do crambe não sofrer influência para alguns dos níveis de pH, MO, P e K encontrados na pesquisa.

3.4. Conclusões

- i. Houve correlação fraca dos mapas temáticos MO, P e K com Pd;
- ii. O mapa temático pH foi o que apresentou maior correlação com a produtividade da cultura do crambe;
- iii. Os mapas temáticos dos atributos químicos apresentaram maior correlação com a produtividade para valores de $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

4. CONCLUSÕES GERAIS

- I. Houve fraca correlação entre os mapas temáticos de atributos físicos e químicos do solo com o da produtividade da cultura do crambe;
- II. Dentre os mapas temáticos dos atributos físicos, RSP1 foi o que apresentou maior correlação com a produtividade do crambe, onde valores de RSP próximos a 1,6 MPa corresponderam a valores de produtividade inferiores a $0,2 \text{ Mg m}^{-3}$;
- III. Dentre os mapas temáticos dos atributos químicos, pH foi o que apresentou maior correlação com a produtividade da cultura do crambe;
- IV. Os mapas temáticos dos atributos químicos apresentaram maior correlação com melhores índices produtividade onde ocorreram valores de $\text{pH} \geq 5,0$, $\text{MO} \geq 5,5 \text{ m/v (\%)}$, $\text{P} \geq 15,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{K} \geq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Mecânica e Biológica para e redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo. 2004, n.28, pp.519-531.

BONINI, Andreia Kusumota; SECCO, Deonir; SANTOS, Reginaldo Ferreira; REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. Cienc. Rural. 2011, vol.41, n.9, pp. 1543-1548.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B; NOVACK, J.M; PARKIN, T.B; KARLEN, D.L; TURCO R.F.; KNOKPA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society America Journal, Madison, 58:1240-1248, 1994.

CAMPOS, Milton César Costa; MARQUES JUNIOR, José; PEREIRA, Gener Tadeu; SOUZA, Zigomar Menezes de; BARBIERI, Diogo Mazza. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas. Cienc. Rural. 2008, vol.38, n.4, pp. 974-980.

CARVALHO, Guilherme J.; CARVALHO, Morel de P; FREDDI, Onã da S. e MARTINS, Mariana V.. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. Ver. bras. eng. agríc. Ambient. 2006, vol.10, n.3, pp. 765-771.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y. and FREDDI, O. S.. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2003, vol.27, n.4, pp. 695-703.

CAVALLINI, Maria Cecília; ANDREOTTI, Marcelo; OLIVEIRA, Letícia Lisbôa; PARIZ, Cristiano Magalhães; CARVALHO, Morel de Passos e. Relações entre produtividade de *Brachiaria Brizantha* e atributos físicos de um latossolo do cerrado. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2010, vol.34, n.4, pp. 1007-1015.

CLARK, I. Practical Geostatistics. 1979. Essex, Applied Science Publishers, 129p.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data. 1991. New York, John Wiley, 900p.

DALCHIAVON, Flávio Carlos; CARVALHO, Morel de Passos e; ANDREOTTI, Marcelo and MONTANARI, Rafael. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. Rev. Ciênc. Agron. 2012, vol.43, n.3, pp. 453-461.

DELLAMEA, Ricardo Batista Cerezer. Eficiência da adubação à taxa variável em áreas manejadas com agricultura de precisão no Rio Grande do Sul. 2008. 161f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, RS.

DURIGON, Reges; SCHLOSSER, José Fernando; RUSSINI, Alexandre; DORNELLES, Marçal Elizandro de Carvalho; PINHEIRO, Eder Dornelles. Correlações entre atributos químicos do solo e atributos da cultura e da produtividade de arroz irrigado determinadas com técnicas de manejo localizado. *Cienc. Rural*. 2009, vol.39, n.9, pp. 2629-2633.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FARACO, Mário Antonio; URIBE-OPAZO, Miguel Angel; SILVA, Edson Antonio Alves da; JOHANN, Jerry Adriani; BORSSOI, Joelmir André. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2008, vol.32, n.2, pp. 463-476.

FREDDI, Onã S.; CARVALHO, Morel P.; VERONESI JUNIOR, Valdenir e CARVALHO, Guilherme J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Eng. Agríc*. 2006, vol.26, n.1, pp. 113-121.

FUNDAÇÃO MS PARA PESQUISA E DIFUSÃO DE TECNOLOGIAS AGROPECUÁRIAS. Crambe FMS Brilhante. Crambe: uma opção rentável para sua safrinha. Maracaju – MS. Disponível em: <http://www.fundacaoms.org.br/page.php?34>. Acesso em: 13/02/2012.

ISAAKS, E.H.; SRISVASTAVA, R.M. Na introduction to applied geostatistics. 1989. New York, Oxford University Press, 560p.

JASPER, Samir Paulo. Cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst): avaliação energética, de custo de produção e produtividade em sistema de plantio direto. 2009. 103f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP.

JOHANN, Jerry A.; OPAZO, Miguel A. U.; SOUZA, Eduardo G. de e ROCHA, Jansle V.. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. *Rev. bras. eng. agríc. ambient*. 2004, vol.8, n.2-3, pp. 212-219.

KITAMURA, Aline Emy; CARVALHO, Morel de Passos e; LIMA, Cesar Gustavo da Rocha. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2007, vol.31, n.2, pp. 361-369.

LEITE, Gabriel Henrique Melo Nascimento; ELTZ, Flávio Luiz Foletto; AMADO, Telmo Jorge Carneiro e COGO, Neroli Pedro. Atributos químicos e perfil de enraizamento de milho influenciados pela calagem em semeadura direta. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2006, vol.30, n.4, pp. 685-693.

LUNELLI, Igor Eduardo. Efeitos de arranjos nutricionais de NPK na produtividade de grãos e rendimento de óleo da cultura do crambe. 2012. 40 f. Dissertação

(mestrado). Universidade Estadual do oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Cascavel, PR.

MELLO J.M. de. Geostatística aplicada ao inventário florestal. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor Ciências Agrárias, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (Esalq-USP), Piracicaba, SP.

MOTOMIYA, Anamari Viegas de Araújo; CORA, José Eduardo e PEREIRA, Gener Tadeu. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2006, vol.30, n.3, pp. 485-496.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems, Hants, 4(3): 313-32, 1990.

PILAU, Felipe Gustavo; BATTISTI, Rafael; SOMAVILLA, Lucindo e SCHWERZ, Luciano. Temperatura basal, duração do ciclo e constante térmica para a cultura do crambe. Bragantia. 2011, vol.70, n.4, pp. 958-964.

PITOL, C. Cultura do Crambe. Tecnologia e Produção: Milho Safrinha e Culturas de Inverno 2008. Fundação MS, 2008. Disponível em: <http://www.fundacaoms.org.br/page.php?21>. Acesso em: 16/02/2012.

R Development Core Team (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REICHERT, J.M. et al. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. Ciência & Ambiente, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil Till Research, v.online, p.1-13, 2008.

RIBEIRO JR., P.J. and DIGGLE, P.J. (2001) geoR: A package for geostatistical analysis. R-NEWS v.1, n.2.

SECCO, Deonir; DA ROS, Clovis Orlando; SECCO, Jana Koefender e FIORIN, Jackson Ernani. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2005, vol.29, n.3, pp. 407-414.

SECCO, Deonir; REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel e SILVA, Vanderlei Rodrigues da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. Cienc. Rural. 2009, vol.39, n.1, pp. 58-64.

SILVA, Paulo C. M. da e CHAVES, Lúcia H. G.. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. Rev. bras. eng. agríc. ambient. [online]. 2001, vol.5, n.3, pp. 431-436.

SILVA, V.R. Propriedades físicas e hídras em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria. 2003. 171f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, RS.

SOARES DE SOUZA LIMA, Julião; OLIVEIRA, Rone Batista de; ROCHA, Wadson da; OLIVEIRA, Paulo César; QUARTEZANI, Waylson Zancanella. Análise espacial de atributos químicos do solo e da produção da cultura pimenta-do-reino (*Piper nigrum*, L.). Idesia. 2010, vol.28, n.2, pp. 31-39.

SOUZA, Zigomar Menezes de; MARQUES JUNIOR, José; PEREIRA, Gener Tadeu e MOREIRA, Luis Fernando. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. Cienc. Rural [online]. 2004, vol.34, n.6, pp. 1763-1771.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Soil tillage and precision agriculture: A theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.61, n.1-2, p.47-54, 2001.

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. Cap.2, p.319-344.

ANEXOS

Anexo 1 – Semivariogramas dos atributos físicos, químicos e da produtividade escolhidos através da validação cruzada

