

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE
EM UM LATOSSOLO: ANÁLISE ESPACIAL E
MODELOS DE CORRELAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Aracéli Ciotti de Marins

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE
EM UM LATOSSOLO: ANÁLISE ESPACIAL E
MODELOS DE CORRELAÇÃO**

Aracéli Ciotti de Marins

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Área de Concentração em Gênese, degradação e manejo da
estrutura do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. PhD. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Marins, Aracéli Ciotti de
Rendimento de grãos e de óleo do crambe em um
latossolo: análise espacial e modelos de correlação. /
Aracéli Ciotti de Marins.-2014.
159 p.; 30cm

Orientador: José Miguel Reichert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Variabilidade espacial 2. Densidade amostral 3.
Semivariograma cruzado I. Reichert, José Miguel II.
Título.

©2014

Todos os direitos autorais reservados a Aracéli Ciotti de Marins. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização do autor.

E-mail: araceli@utfpr.edu.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE EM UM
LATOSSOLO: ANÁLISE ESPACIAL E MODELOS DE CORRELAÇÃO**

elaborada por
Aracéli Ciotti de Marins

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, PhD. (UFSM)

Ricardo Bergamo Schenato, Dr. (UFSM)

Rosangela Aparecida Botinha Assumpção, Dra. (UTFPR)

Jerry Adriani Johann, Dr. (UNIOESTE)

Santa Maria, 28 de novembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida;

Ao meu esposo Deonir Secco, pela compreensão, companheirismo e apoio incondicional;

Ao professor José Miguel Reichert, pela oportunidade e orientação;

À minha família e meus amigos, pelo apoio;

À Universidade Federal de Santa Maria, pela qualidade do ensino público e gratuito;

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade;

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela qualidade dos ensinamentos, em especial ao professor Jean, pela co-orientação;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela liberação para cursar o doutorado;

Aos colegas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por terem me substituído durante o afastamento;

À Faculdade Assis Gurgacz pela cedência da área para realização deste trabalho, em especial ao Cornélio e ao Helmuth pelo apoio nas atividades de campo;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela cedência do Laboratório de Física do Solo;

Ao grupo de pesquisa de física do solo da Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela ajuda nas coletas de amostras e trabalhos no laboratório: Bruna, Guilherme, Diego, Gustavo, Helton, Marcos, Ricardo, Ângelo;

Ao Alexandro, pelo grande auxílio na programação dos modelos;

Ao Fontinelli, pela orientação nas análises e empréstimos de materiais;

Ao Laboratório A3Q e ao Carlos pela análise do teor de óleo;

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, e não estão aqui nominados.

MUITO OBRIGADA!!!!

“The important thing in science is not so much to obtain new facts
as to discover new ways of thinking about them”

(Sir William Henry Bragg, Nobel Prize for Physics, 1915).

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE EM UM LATOSSOLO: ANÁLISE ESPACIAL E MODELOS DE CORRELAÇÃO

AUTORA: ARACÉLI CIOTTI DE MARINS

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de novembro de 2014.

A crescente conscientização ambiental a respeito da produção e uso de combustíveis renováveis tem levado muitos países a criar políticas que beneficiam os produtores destes combustíveis. Assim, a busca por matéria-prima para produção dos biocombustíveis não conflitantes com a produção mundial de alimentos e que apresentem desempenho semelhante aos combustíveis fósseis despertou interesse pelo crambe, uma cultura de grande teor energético, imprópria para o consumo animal e que pode ser aplicada em rotação de culturas sem a necessidade de troca de maquinário agrícola. No entanto, estudos avaliando a influência da variabilidade espacial de atributos químicos e físicos no rendimento de grãos e no teor de óleo do crambe ainda são escassos. Neste sentido, este trabalho objetivou principalmente avaliar a correlação espacial entre atributos físicos e químicos de um Latossolo sob estados de compactação, com o rendimento de grãos e de óleo do crambe, através de um estimador de correlação cruzada baseado em janelas móveis e avaliar a densidade amostral adequada para aplicação da geoestatística. Para isto, utilizaram-se técnicas de geoestatística como a simulação de dados e krigagem com auxílio do software R. Concluiu-se que o aumento da densidade e da resistência do solo altera a relação fonte:dreno do crambe, repercutindo em menor rendimento de grãos, porém com produção de grãos de maior qualidade; os atributos químicos que apresentam maior relação espacial direta com o rendimento de grãos do crambe são o fósforo, cálcio, magnésio e matéria orgânica; malhas amostrais construídas com pontos espaçados a grandes distâncias não são eficazes na detecção da variabilidade espacial de atributos químicos e do rendimento de grãos e teor de óleo do crambe; e que o semivariograma cruzado baseado em janelas móveis detecta a estrutura de correlação espacial entre os atributos físicos e químicos do solo, independente de sua variabilidade ou dispersão, apresentando desempenho superior quando os dados apresentam *outliers* e não possuem distribuição normal.

Palavras-chave: Variabilidade espacial. Densidade amostral. Semivariograma cruzado.

ABSTRACT

Doctorate Course Thesis
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

GRAINS YIELD AND OIL CONTENT OF CRAMBE IN AN OXISOL: SPATIAL ANALISYS AND CORRELATION MODELS

AUTHOR: ARACÉLI CIOTTI DE MARINS

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Defense Place and Date: Santa Maria, November 28nd, 2014.

The growing environmental awareness regarding production and use of renewable fuels has led many of countries to create policies to benefit producers of renewable fuels. Thus, the search for raw materials for production of biofuels, which do not conflict with the global food production and exhibit similar performance to fossil fuels, has generated interest towards crambe, a crop of high oil content, inappropriate for animal consumption and which can be applied in crop rotation without the need for exchange farm machinery. However, studies evaluating the influence of spatial variability of soil chemical and physical properties on grain yield and oil content of crambe are scarce. Thus, this study aimed to evaluate the spatial correlation between physical and chemical properties of an Oxisol under compaction states with grain yield and oil content of crambe, through a cross-correlation estimator based on moving windows and assess adequate sampling density for application of geostatistics. For this, we used geostatistical techniques such as kriging and simulation data and using software R. We concluded that increased bulk density and soil resistance to penetration change the source:sinc relationship of crambe, reflecting in lower yield but with grain production of higher quality; chemical attributes that have higher direct spatial relationship to grain yield of crambe are phosphorus, calcium, magnesium and organic matter; sampling grids constructed with points spaced at large distances are not effective in detecting the spatial variability of chemical attributes and grain yield and oil content of crambe; and that the cross semivariogram based on moving windows detects the structure of spatial correlation between the physical and chemical soil properties, independent of its variability or dispersion, showing superior performance when the data have outliers and do not have normal distribution.

Key words: Spatial variability. Sampling density. Cross semivariogram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Distribuição das regiões onde os governos desenvolvem princípios de sustentabilidade para biomassa e bioenergia	33
Figura 2 –	Mapa da área experimental.....	39
Figura 1.1 –	Malha amostral apresentando a distribuição dos pontos georreferenciados e os estados de compactação/tratamentos: 0P: sem passadas do rolo compactador, 1P: uma passada do rolo, 3P: três passadas do rolo e 5P: cinco passadas do rolo	46
Figura 1.2 –	Mapas de superfície da densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	52
Figura 1.3 –	Mapas de superfície da porosidade total (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	53
Figura 1.4 –	Mapas de superfície da macroporosidade (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	54
Figura 1.5 –	Mapas de superfície da microporosidade (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	55
Figura 1.6 –	Mapas de superfície da resistência do solo à penetração (MPa) nas duas épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	56
Figura 1.7 –	Teor de óleo (%) no ano de 2012(a) e rendimento de grãos ($Mg\ ha^{-1}$) nos anos 2012(b) e 2013(c)	57
Figura 1.8 –	Semivariogramas cruzados entre a Ds e teor de óleo e Ds e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas	58
Figura 1.9 –	Semivariogramas cruzados entre a macro e teor de óleo e macro e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas	58
Figura 1.10 –	Semivariogramas cruzados entre a micro e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas.....	59
Figura 1.11 –	Semivariogramas cruzados entre a Rp e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas	60
Figura 2.1 –	Condutividade hidráulica do solo saturado ($K\theta_s$) e permeabilidade do solo ao ar (K_a) nos tratamentos 0P, 1P, 3P e 5P	68
Figura 2.2 –	Comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado ($K\theta_s$) em função da densidade do solo (Ds) na profundidade de 0,1-0,2 m.....	69
Figura 2.3 –	Teor de óleo do crambe em função da condutividade hidráulica do solo saturado ($K\theta_s$) (a) e do grau de compactação do solo (b) e rendimento de grãos do crambe em função da condutividade hidráulica do solo saturado (c) e do grau de compactação (d) na camada de 0,1-0,2 m.....	70
Figura 3.1 –	Malhas amostrais apresentando a distribuição dos pontos georreferenciados..	77
Figura 3.2 –	Declividade da área amostral	81

Figura 3.3 – Mapas de superfície dos macronutrientes: Ca(a, b); Mg(c, d); N (MO: e, f) e P(g), respectivamente em 2012 e 2013	82
Figura 3.4 – Mapas de superfície dos micronutrientes: B(a, b); Cu(c); S(d, e) e Zn(f), respectivamente em 2012 e 2013	83
Figura 3.5 – Mapas dos atributos Al(a, b); Saltação por Al(c, d); Saturação por Bases(e,f) e pH(g,h), respectivamente em 2012 e 2013	84
Figura 3.6 – Mapas de superfície do rendimento de grãos do crambe (Mg ha^{-1}) em 2012, utilizando as seis malhas experimentais e a escala obtida pela simulação dos dados na Malha(a)	85
Figura 4.1 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Esférico	97
Figura 4.2 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Exponencial	97
Figura 4.3 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Gaussiano.....	98
Figura 4.4 – Semivariograma cruzado entre Al e rendimento de grãos do crambe em 2012 (a) e 2013 (b) e entre pH e rendimento de grãos do crambe em 2012(c) e 2013 (d)	99
Figura 4.5 – Semivariograma cruzado entre Ca e rendimento de grãos do crambe em 2012 (a) e 2013 (b); entre K e rendimento de grãos do crambe em 2012 (c) e 2013 (d); entre Mg e rendimento de grãos do crambe em 2012 (e) e 2013 (f); entre N (MO) e o rendimento de grãos do crambe em 2012 (g) e em 2013 (h); e entre P e rendimento de grãos do crambe em 2012 (i) e 2013 (j)	101
Figura 4.6 – Semivariograma cruzado entre o rendimento de grãos do crambe e Al (a) rendimento de grãos do crambe e Ca (b), rendimento de grãos do crambe e K (c), rendimento de grãos do crambe e Mg (d), rendimento de grãos do crambe e N (MO), rendimento de grãos do crambe e P (f) e rendimento de grãos do crambe e pH (g) em 2012	102
Figura 4.7 – Semivariograma cruzado entre a Ds e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas	103
Figura 4.8 – Semivariograma cruzado entre a macro e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas	104
Figura 4.9 – Semivariograma cruzado entre a micro e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas	105
Figura 4.10 – Semivariograma cruzado entre o teor de óleo do crambe e Ds, macro e micro nas três camadas, após o primeiro cultivo do crambe, nas três camadas avaliadas	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de partículas e granulometria do solo nas três camadas analisadas no experimento	40
Tabela 2 – Cronologia do experimento	41
Tabela 1.1 – Umidade gravimétrica (%) no momento da passagem do rolo compactador nas três camadas e quatro tratamentos (média de cinco repetições).....	46
Tabela 1.2 – Estatística descritiva e espacial dos atributos físicos do solo	51
Tabela 2.1 – Grau de compactação (Gc) médio em função da faixa de densidade do solo (Ds) na camada de 0,10-0,20 m e Rendimento de grãos, teor de óleo e produção de óleo do crambe	66
Tabela 2.2 – Grau de compactação (Gc) médio em função da faixa de densidade do solo (Ds) na camada de 0,10-0,20 m e Rendimento de grãos, teor de óleo e produção de óleo do crambe	67
Tabela 2.3 – Avaliação dos modelos de correlação e normalidade dos resíduos	69
Tabela 3.1 – Resultado das análises descritivas e estrutura de dependência espacial dos atributos químicos avaliados nos dois anos de estudo	80
Tabela 3.2 – Matriz de erro de classificação entre os mapas gerados pelas malhas amostrais (a) e (b) para o Rendimento de grãos do crambe em 2012.....	85
Tabela 3.3 – Índices de similaridade entre o mapa gerado pela malha(b) e as demais malhas amostrais [(c), (d), (e) e (f)] para o rendimento de grãos do crambe, macronutrientes e pH nos Anos de 2012 e 2013	86
Tabela 4.1 – Estrutura de correlação espacial adotadas para geração de conjuntos de dados utilizados na comparação entre o semivariograma cruzado e o semivariograma cruzado baseado em janelas móveis.....	94
Tabela 4.2 – Somas dos quadrados das diferenças entre o semivariância cruzada simulada e estimada pelo SCJM e SC	96
Tabela 4.3 – Somas dos Quadrados das diferenças entre a semivariância cruzada simulada e estimada pelos SCJM e SC, para dados contaminados com pontos discrepantes e sem distribuição de normalidade	99

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1	47
Equação 1.2	47
Equação 1.3	48
Equação 1.4	48
Equação 1.5	49
Equação 1.6	49
Equação 2.1	65
Equação 3.1	79
Equação 3.2	79
Equação 3.3	85
Equação 3.4	85
Equação 4.1	90
Equação 4.2	90
Equação 4.3	91
Equação 4.4	91
Equação 4.5	92
Equação 4.6	92
Equação 4.7	92
Equação 4.8	93
Equação 4.9	94
Equação 4.10	94
Equação 4.11	94
Equação 4.12	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>a</i>	alcance
Al	Alumínio
AP	Agricultura de Precisão
B	Boro
Ca	Cálcio
cfa	clima temperado mesotérmico e super-úmido
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de Variação
C_0	efeito pepita
C_0+C_1	patamar
C_1	variância estruturada
Dp	Densidade de partículas
Ds	Densidade do solo
Epp	Efeito pepita puro
Esf	Esférico
Exp	Exponencial
FD	Faixa de Dependência
Gau	Gaussiano
Gc	Grau de compactação
GD	Grau de Dependência
K	Potássio
Ka	permeabilidade do solo ao ar
$K\theta_s$	condutividade hidráulica do solo saturado
macro	macroporosidade
micro	microporosidade
Mg	Magnésio

MO	Matéria Orgânica
MT	Modelo Teórico
P	Fósforo
pH	potencial de Hidrogênio
PT	Porosidade Total
Rend	Rendimento de grãos do crambe
Rp	Resistência do solo à penetração
S	Enxofre
SC	Semivariograma Cruzado
SCJM	Semivariograma Cruzado baseado em Janelas Móveis
SatAl	Saturação por Alumínio
V	Saturação por Bases
Zn	Zinco
0P	tratamento sem passadas do rolo compactador
1P	tratamento com uma passada do rolo compactador
3P	tratamento com três passadas do rolo compactador
5P	tratamento com cinco passadas do rolo compactador

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	123
ANEXO B	124
ANEXO C	145
ANEXO D	146
ANEXO E	158

SUMÁRIO

HIPÓTESES.....	25
OBJETIVOS	27
INTRODUÇÃO.....	29
REVISÃO DE LITERATURA	31
Biocombustíveis e crambe	31
Influência da compactação nos atributos físico-hídricos do solo e no rendimento de grãos das culturas agrícolas	34
Variabilidade e correlação espacial dos atributos físicos e químicos do solo.....	36
MATERIAL E MÉTODOS GERAIS	39
Área experimental, clima e solo.....	39
Semeadura do crambe e avaliação do rendimento de grãos e de óleo	40
CAPÍTULO 1 – Variabilidade espacial do rendimento de grãos e de óleo do crambe associada a estados de compactação de um Latossolo argiloso	43
Resumo.....	43
1.1 Introdução	44
1.2 Material e métodos	45
1.2.1 Estabelecimento dos tratamentos, malha experimental e coleta de amostras do solo ..	45
1.2.2 Determinações físicas do solo	47
1.2.3 Análise descritiva e espacial	48
1.3 Resultados e discussão	49
1.4 Conclusões	60
CAPÍTULO 2 – Implicações de estados de compactação em atributos físico-hídricos de um Latossolo argiloso e no rendimento de grãos e de óleo do crambe	61
Resumo.....	61
2.1 Introdução	62
2.2 Material e métodos	63
2.2.1 Estabelecimento dos tratamentos.....	63
2.2.2 Determinações físicas do solo	64
2.2.3 Análise gráfica e estatística	65
2.3 Resultados e discussão.....	66
2.4 Conclusões	71
CAPÍTULO 3 – AMOSTRAGEM PARA VALIDAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO E SEUS REFLEXOS NO RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE.....	73

	Resumo	73
3.1	Introdução.....	74
3.2	Material e métodos	76
3.2.1	Malha experimental.....	76
3.2.2	Coleta de amostras e determinações químicas do solo	77
3.2.3	Análise estatística.....	78
3.3	Resultados e discussão	79
3.4	Conclusões.....	87
	CAPÍTULO 4 – MODELO DE CORRELAÇÃO ESPACIAL BASEADO EM JANELAS MÓVEIS APLICADO A ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO E RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE	89
	Resumo	89
4.1	Introdução.....	90
4.2	Material e métodos	92
4.2.1	Geração do modelo de correlação espacial	92
4.2.2	Simulação de dados e comparação dos modelos de correlação espacial	93
4.2.3	Avaliação da correlação espacial dos atributos físicos e químicos do solo	95
4.3	Resultados e discussão	96
4.3.1	Análise de dados simulados	96
4.3.2	Análise dos dados reais	99
4.4	Conclusões.....	106
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	ANEXOS	121

HIPÓTESES

- Hipótese 1: As raízes do crambe possuem poder estruturante no solo, provocando redução da densidade e resistência do solo à penetração com aumento da macroporosidade ao longo do tempo.
- Hipótese 2: Nas regiões da lavoura com maior tráfego de máquinas e implementos agrícolas, ocorrem alterações negativas na densidade, espaço poroso e resistência do solo à penetração, reduzindo o rendimento de grãos e de óleo da cultura do crambe.
- Hipótese 3: A distribuição espacial dos atributos químicos do solo influencia no rendimento de grãos e de óleo do crambe e, para que seja avaliada com precisão e exatidão, são necessárias malhas amostrais com um número de pontos maior que o convencionalmente utilizado.
- Hipótese 4: Modelos geoestatísticos construídos utilizando janelas móveis para a determinação da correlação espacial entre variáveis de atributos físicos e químicos do solo são mais eficientes que o semivariograma cruzado.

OBJETIVOS

Geral

Avaliar a estrutura de dependência espacial de atributos físicos e químicos do solo, correlacionando-os com o rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe, desenvolvendo um modelo de correlação espacial baseado em janelas móveis e quantificando o número de pontos amostrais necessários para avaliação precisa da estrutura de dependência espacial entre amostras.

Específicos

Capítulo 1

- Verificar a correlação espacial entre a densidade do solo (D_s), resistência do solo à penetração (R_p), porosidade do solo e o rendimento de grãos e de óleo da cultura do crambe;
- Avaliar a variabilidade espacial da D_s , R_p , porosidade do solo e o rendimento de grãos e de óleo da cultura do crambe;
- Verificar se há influência do sistema radicular do crambe nos atributos físicos avaliados.

Capítulo 2

- Avaliar a influência de estados de compactação de um Latossolo argiloso na permeabilidade do solo ao ar (K_a), condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta s}$), porosidade e D_s e suas implicações no rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe.

Capítulo 3

- Avaliar a variabilidade espacial dos seguintes atributos/características químico(a)s do solo: Alumínio (Al), Boro (B), Cálcio (Ca), CTC, Cobre (Cu), Potássio (K), Magnésio (Mg), Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), pH, Enxofre (S), Saturação por Al, Saturação por Bases (V) e Zinco (Zn);
- Verificar a relação espacial destes atributos com o rendimento de grãos e de óleo do crambe;
- Averiguar a amostragem para validação do mapeamento destas variáveis.

Capítulo 4

- Apresentar um estimador do semivariograma cruzado baseado em janelas móveis, obtido a partir do estimador do semivariograma proposto por Li e Lake (1994);
- Comparar o estimador baseado em janelas móveis com o semivariograma cruzado e aplicá-lo a dados de atributos químicos e físicos do solo;
- Verificar o comportamento do semivariograma cruzado baseado em janelas móveis na presença de *outliers*, dados com alta variabilidade ou dados que não apresentam distribuição normal de probabilidade.

INTRODUÇÃO

Pesquisadores de todo o mundo têm dado importância à área de produção de biocombustíveis na tentativa de reduzir o impacto ambiental causado pelo extensivo uso de combustíveis fósseis. Atualmente, a produção, o cultivo e os fatores que afetam o rendimento de grãos do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst – Anexo A) vêm sendo pesquisados para este fim, principalmente por se tratar de uma cultura resistente à seca e à geada e por ser facilmente adaptada à rotação de culturas.

Inúmeras são as vantagens da utilização do crambe para produção de biocombustível, dentre elas o fato de possuir grande teor de óleo em suas sementes e baixo custo de produção, se comparado a outras culturas oleaginosas, além de possuir um sistema radicular agressivo que acredita-se melhorar a estrutura do solo.

Entretanto, na área de dependência espacial visando aplicação da Agricultura de Precisão (AP), poucos artigos têm sido feitos avaliando esta cultura, principalmente no que diz respeito a atributos físicos e químicos do solo, tampouco sobre densidade amostral necessária para uma avaliação adequada da dependência espacial entre as amostras do solo ou da correlação espacial entre variáveis. Sabe-se que a qualidade estrutural do solo repercute de maneira significativa no aumento do rendimento de grãos de culturas agrícolas, no entanto, pouco se sabe dos efeitos da compactação do solo sobre o rendimento de grãos do crambe.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estrutura de dependência espacial de atributos físicos e químicos do solo, correlacionando-os com o rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe, desenvolvendo um modelo de correlação espacial baseado em janelas móveis e quantificando o número de pontos amostrais necessários para avaliação precisa da estrutura de dependência espacial entre amostras.

No Capítulo 1, foi realizada uma análise geoestatística para verificar a dependência espacial de atributos físicos do solo e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe, além de verificar a correlação espacial entre a D_s , R_p e porosidade do solo com o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe.

No Capítulo 2, avaliou-se a influência de estados de compactação de um Latossolo argiloso nos atributos físico-hídricos do solo (K_a , $K\theta_s$), porosidade e D_s , e suas implicações no rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe.

No Capítulo 3, foi avaliada a variabilidade espacial dos atributos/características químico(a)s do solo: Alumínio (Al), Boro (B), Cálcio (Ca), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Cobre (Cu), Potássio (K), Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), potencial de Hidrogênio (pH), Enxofre (S), Saturação por Al (SatAl), Saturação por Bases (V) e Zinco (Zn), relacionando com o rendimento de grãos e de óleo do crambe e averiguada a densidade amostral para mapeamento destas variáveis.

No Capítulo 4 foi construído um modelo de correlação espacial baseado em janelas móveis, que foi aplicado aos atributos físicos e químicos do solo e comparado ao semivariograma cruzado pela sua aplicação a dados simulados.

REVISÃO DE LITERATURA

Biocombustíveis e crambe

Os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis e a redução de gases de efeito estufa através do sequestro de carbono durante o crescimento das plantas (Koh e Ghazoul, 2008; Scarlat e Dallemand, 2011), são os principais motivadores de políticas sociais e certificados governamentais incentivadores da produção e uso de biocombustíveis.

Outros fatores que influenciam a utilização de biocombustíveis são: as potenciais limitações na oferta dos combustíveis fósseis (Markevicius et al., 2010), a oportunidade para criação de empregos e desenvolvimento rural, o aumento na diversidade do fornecimento de energia e segurança do abastecimento (Koh e Ghazoul, 2008; Scarlat e Dallemand, 2011), a flexibilidade dos biocombustíveis de serem misturados aos combustíveis fósseis e o fato de serem renováveis (Gnansounou, 2011).

O início da produção de biocombustíveis ocorreu no Brasil, com a criação do Programa Nacional Proálcool em 1975, devido ao choque do petróleo de 1973 e a diminuição dos preços mundiais do açúcar. O governo incentivou a produção do etanol, reduzindo os impostos e fornecendo subsídios para sua produção (Scarlat e Dallemand, 2011). Segundo Sorda, Banse e Kemfert (2010) o Brasil tem o programa de biocombustíveis mais desenvolvido e integrado do mundo.

Dentre muitas iniciativas para a utilização de biocombustíveis, a Diretiva Europeia de Energias Renováveis exige biocombustíveis para reduzir emissões de gases de efeito estufa em 35% em comparação com os combustíveis fósseis (Hennecke et al., 2013).

Outros países encaram a produção de biocombustíveis como a chave para independência do petróleo estrangeiro e acabar com as preocupações de segurança energética e a necessidade de responder às mudanças climáticas (Koh e Ghazoul, 2008), aliado aos motivos já listados, têm desenvolvido certificados para quem os produz, como os citados por Scarlat e Dallemand (2011), dentre outros:

- International Sustainability and Carbon Certification (Alemanha);
- European Committee for Standardisation standard for sustainably produced biomass for energy applications (toda a Europa);

- Sustainable Production of Biomass (Holanda);
- Renewable Transport Fuels Obligation (Reino Unido);
- The California Low Carbon Fuel Standard (Estados Unidos);
- United States Renewable Fuels Standard (Estados Unidos);
- The Council on Sustainable Biomass Production (Estados Unidos);
- Global Bioenergy Partnership (Países do G8 e Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul);
- SO/PC 248 sustainability criteria for bioenergy (21 países envolvidos);
- Programa Nacional de Produção e Uso do Petróleo (Brasil).

Embora haja tantas vantagens na produção e uso dos biocombustíveis, há pesquisadores e governantes contra esta ideia, alegando motivos ambientais, possível não sustentabilidade e motivos econômicos. Dentre estas alegações, estão a falta de provas convincentes de menores emissões de gases de efeito estufa dos biocombustíveis, quando comparados aos combustíveis fósseis (Scarlat e Dallemand, 2011) e falta de indicadores de que a utilização da biomassa para produção de biocombustíveis implique automaticamente que a sua produção, transformação e uso sejam sustentáveis (Markevicius et al., 2010).

Os motivos econômicos como o aumento nos preços dos alimentos, haja vista um possível conflito de interesse entre o plantio de matéria-prima para produção de biocombustíveis e outros alimentos (Gnansounou, 2011), uma vez que estas matérias-primas estão sendo plantadas em terras férteis (Scarlat e Dallemand, 2011) e outros motivos ainda como o fato dos biocombustíveis apresentarem desempenho inferior ao apresentado pelos combustíveis fósseis (Gnansounou, 2011) também levam muitos a desacreditar na importância da produção e uso de biocombustíveis.

Neste sentido, para reduzir o impacto da produção de biocombustíveis em commodities alimentares, e também reduzir a emissão de gases de efeito estufa, tem sido dada maior atenção ao desenvolvimento de biodiesel de segunda geração, que se refere aos biocombustíveis que são fabricados a partir de matéria-prima não alimentar, cultivada nas entressafras de cultivos alimentares, visando tornar os biocombustíveis mais aceitáveis pela sociedade (Sorda, Banse e Kemfert, 2010).

Dam, Junginger e Faaij (2010) avaliaram os esforços dos governos para incentivo na produção de biocombustíveis e de acordo com os autores, há três focos principais nas políticas governamentais para os biocombustíveis: “foco em impactos socioeconômicos”, “foco em impactos ambientais” e “foco em competição com alimentos”. Os autores mapearam estes focos baseados nas políticas de cada país para este fim. A figura 1 apresenta a distribuição das

regiões “chaves” onde os governos desenvolvem princípios de sustentabilidade para biomassa e bioenergia. Observa-se que no Brasil, o foco é apenas nos impactos socioeconômicos.

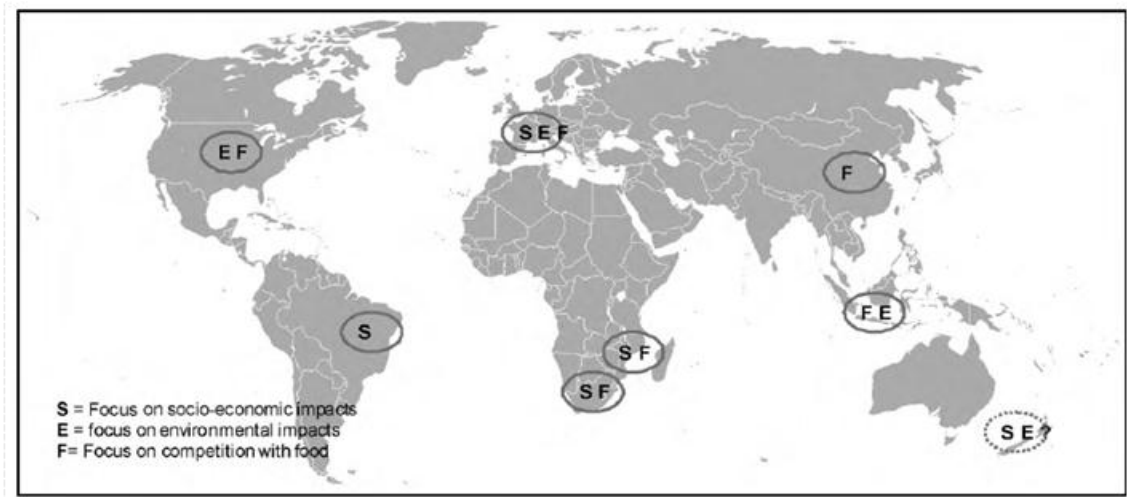


Figura 1 – Distribuição das regiões onde os governos desenvolvem princípios de sustentabilidade para biomassa e bioenergia.

Fonte: Dam, Junginger e Faaij (2010).

Assim, para garantir um futuro sustentável e reduzir a dependência de fonte finita de combustíveis fósseis os biocombustíveis devem proceder de fontes diversificadas de energia (Koh e Ghazoul, 2008), principalmente de fontes que não gerem competições com a produção de alimentos, seja por espaço/tempo para produção, seja pelo aumento dos preços dos alimentos.

O crambe é uma Brassicaceae originária do Mediterrâneo (Lalas et al., 2012), que atualmente vem sendo pesquisado devido à sua aptidão para produção de biocombustível. Suas sementes possuem alto teor de óleo (acima de 38%) (Martins et al., 2012) e um sistema radicular com potencial estruturante do solo (Jasper et al., 2010a), motivos que fizeram do crambe a segunda cultura oleaginosa mais pesquisada em revistas científicas específicas de produção de óleo, entre os anos 1950 e 2010 e a segunda mais pesquisada e citada em 2011 (Cruz e Dierig, 2012).

O fato do crambe ser adaptável à rotação de culturas, podendo ser utilizado como safrinha após a colheita da soja no Brasil (Falasca et al., 2010), com o cultivo totalmente mecanizado, poder ser cultivado também sob árvores ou ao longo das bordas das culturas e

ser tóxico para o consumo animal (Lalas et al., 2012), não gera competição com a produção de alimentos, o que atende a um dos principais objetivos da busca por oleaginosas para geração de biocombustíveis (Fioreze et al., 2013). Segundo estes autores, o crambe é uma importante cultura para produção de biocombustível, pois seu óleo contem características únicas, tais como o elevado teor de ácido erúico, que pode ser utilizado como lubrificante industrial, inibidor de corrosão, bem como ingrediente na fabricação de borracha sintética.

A qualidade do biocombustível é da maior importância para o sucesso na sua comercialização. Comparando o biodiesel produzido com crambe e soja, avaliando a estabilidade, conclui-se que o biodiesel feito a partir do crambe é mais estável e que a mistura do biodiesel de soja com crambe aumenta a estabilidade quando comparado com o biodiesel de soja puro (Wazilewski et al., 2013).

A qualidade do biocombustível também pode ser avaliada pelo desempenho dos motores, consumo específico, eficiência e emissão de gases produzidos pela combustão. Rosa et al. (2014) compararam óleo diesel ao biodiesel gerado com crambe, e concluíram que não houve diferença significativa entre os dois óleos avaliados quanto ao consumo e à eficiência, porém, ao utilizar o biodiesel produzido com crambe, houve redução significativa de todos os gases testados (CO, NOx, NO e SO₂).

Tendo em vista as características positivas do crambe, torna-se necessário avaliar a influência dos atributos físicos e químicos do solo no rendimento de grãos e no teor de óleo da cultura.

Influência da compactação nos atributos físico-hídricos do solo e no rendimento de grãos das culturas agrícolas

A compactação do solo é caracterizada pela compressão dos agregados resultante do aumento da Ds, causando redução do volume e continuidade de poros estruturais (Newell-Price et al., 2013) e conseqüentemente menores taxas de infiltração de água e drenagem da camada compactada (Bangita e Rao, 2012). A compactação é um dos parâmetros fundamentais para a avaliação do impacto ambiental da produção agrícola (Marsili et al., 1998), embora sua caracterização apresente inúmeros desafios, devido à natureza tridimensional da estrutura do solo (Newell-Price et al., 2013).

A compactação pode ser resultante do tráfego de máquinas no solo, principalmente em sistemas altamente mecanizados de produção agrícola. O uso de máquinas cada vez mais pesadas pode ter efeitos desfavoráveis nas propriedades do solo e nas plantas, pois as culturas agrícolas podem ser influenciadas negativamente pelo excesso de compactação do solo (Marsili et al., 1998; Nadezhdina et al., 2012; Valicheski et al., 2012; Newell-Price et al., 2013).

A compactação do solo envolve as alterações nas propriedades físicas do solo (porosidade, D_s , R_p , taxa de infiltração de água e redução de arejamento), que resultam em alterações nas propriedades químicas do solo e ciclos biogeoquímicos (condições redutoras, ciclos de carbono e nitrogênio), na biodiversidade do solo (população bacteriana, a atividade enzimática, fauna do solo e flora terrestre) e nas plantas (raízes, emergência das plântulas e absorção de nutrientes) (Nawaz, Bourrié e Trolard, 2013).

O efeito da compactação do solo sobre as plantas é uma informação necessária para orientar as ações de uso e manejo do solo (Gubiani, Reichert e Reinert, 2013). Segundo os autores, há grande volume de pesquisas buscando estabelecer relações entre a compactação e o rendimento de grãos das culturas.

Há pesquisas que apontam para alterações causadas pelo intenso tráfego de máquinas e implementos de preparo do solo nas propriedades físicas do solo, que indicam não apenas decréscimo na porosidade do solo, mas também aumento significativo na D_s . A R_p , a taxa de infiltração e o volume de macroporos têm sido medidas amplamente utilizadas para avaliar o estado de compactação do solo (Valicheski et al., 2012; Nawaz, Bourrié e Trolard, 2013).

O trabalho feito por Reichert et al. (2009b) apresenta índices críticos de D_s considerando a restrição ao desenvolvimento radicular ou decréscimo no rendimento das culturas, observados por diversos pesquisadores em diferentes solos.

Além de entender o processo de compactação do solo e sua influência nas propriedades do solo e no desenvolvimento e produção das plantas, é necessário conhecer formas de reduzir a compactação. Valicheski et al. (2012) recomendam que não seja realizado apenas o processo mecânico para romper camadas compactadas do solo, mas sim, o uso de espécies de cobertura, sobretudo com a utilização da rotação de culturas com espécies vegetais com sistema radicular vigoroso, que possa romper as camadas compactadas do solo.

Variabilidade e correlação espacial dos atributos físicos e químicos do solo

A AP representa um conjunto de técnicas bastante utilizadas em grandes áreas agrícolas, com o objetivo principal de atender às necessidades específicas de cada parte da área. Para a aplicação da AP, no entanto, é necessário conhecer a variabilidade espacial das variáveis que se pretende avaliar, como por exemplo, os atributos físicos ou a fertilidade do solo (Neto et al., 2014).

Devido à alta variabilidade dos níveis de nutrientes nos campos agrícolas, aplicações de fertilizantes uniformes são susceptíveis de levar à fertilização excessiva em algumas áreas e inadequada em outras (Cerri e Magalhães, 2012). Este problema é minimizado a partir da aplicação de técnicas da AP, que permitem a aplicação de insumos de forma variável, visando atender às necessidades específicas de cada local. Desta forma, otimiza-se o processo de produção e reduz-se os impactos ambientais causados pelas práticas agrícolas (Bottega et al., 2013), já que a fertilidade do solo é um fator decisivo para o rendimento satisfatório das culturas agrícolas e a sua distribuição espacial pode fazer com que determinadas partes da lavoura tenham maior e outras menor produtividade (Lima, Silva e Silva, 2013).

A variabilidade do solo não tem apenas implicações no rendimento de grãos, mas também nos aspectos econômicos e ambientais da produção agrícola, na capacidade do trabalho agrícola e na sustentabilidade do setor (Umali et al., 2012).

A avaliação da variabilidade espacial de atributos do solo vem sendo feita pela análise geoestatística, que busca aprimorar técnicas que viabilizem o uso correto e responsável do solo (Neto et al., 2014). A geoestatística tem se mostrado de grande utilidade na ciência do solo para caracterizar e estudar a variação espacial de suas propriedades (Bottega et al., 2013).

A geoestatística fornece um conjunto de técnicas estatísticas que leva em conta as coordenadas espaciais de observações do solo nas análises dos dados, permitindo a descrição de padrões espaciais e estimativa de valores em locais não amostrados de um conjunto de dados, partindo do princípio de que pontos mais próximos entre si em uma área amostral são mais semelhantes que pontos mais distantes (Burgos et al., 2008; Coelho, Cortez e Olszewski, 2012).

A geoestatística tem sido amplamente aplicada no estudo da variabilidade espacial de atributos físicos do solo (Buczko, Bens e Durner, 2006; Lannoy et al., 2006; Brocca et al., 2007; Camargo, Marques Júnior e Pereira, 2010; Coelho, Cortez e Olszewski, 2012; Mion et al., 2012), hídricos (Zimmermann e Elsenbeer, 2008; Orjuela-Matta, Sanabria e Camacho-

Tamayo, 2012), atributos químicos do solo (Gallardo e Paramá, 2007; Camargo et al., 2012; Cerri e Magalhães, 2012; Lima, Silva e Silva, 2013) e problemas ambientais como contaminantes (Burgos et al., 2006; Burgos et al., 2008), além de sua implicação nos dados de rendimento de grãos de culturas agrícolas.

MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

Área experimental, clima e solo

O experimento foi instalado no município de Cascavel-PR, em uma área de um hectare, localizada sob as coordenadas 24°62'S latitude e 72°39'W longitude, com altitude média de 760 m, em uma área experimental pertencente à Faculdade Assis Gurgacz (Figura 2). A área do experimento vinha sendo utilizada em rotação de culturas sob sistema plantio direto por cerca de dez anos com as culturas soja, milho, trigo e aveia; e nos últimos três anos, por crambe e milho.

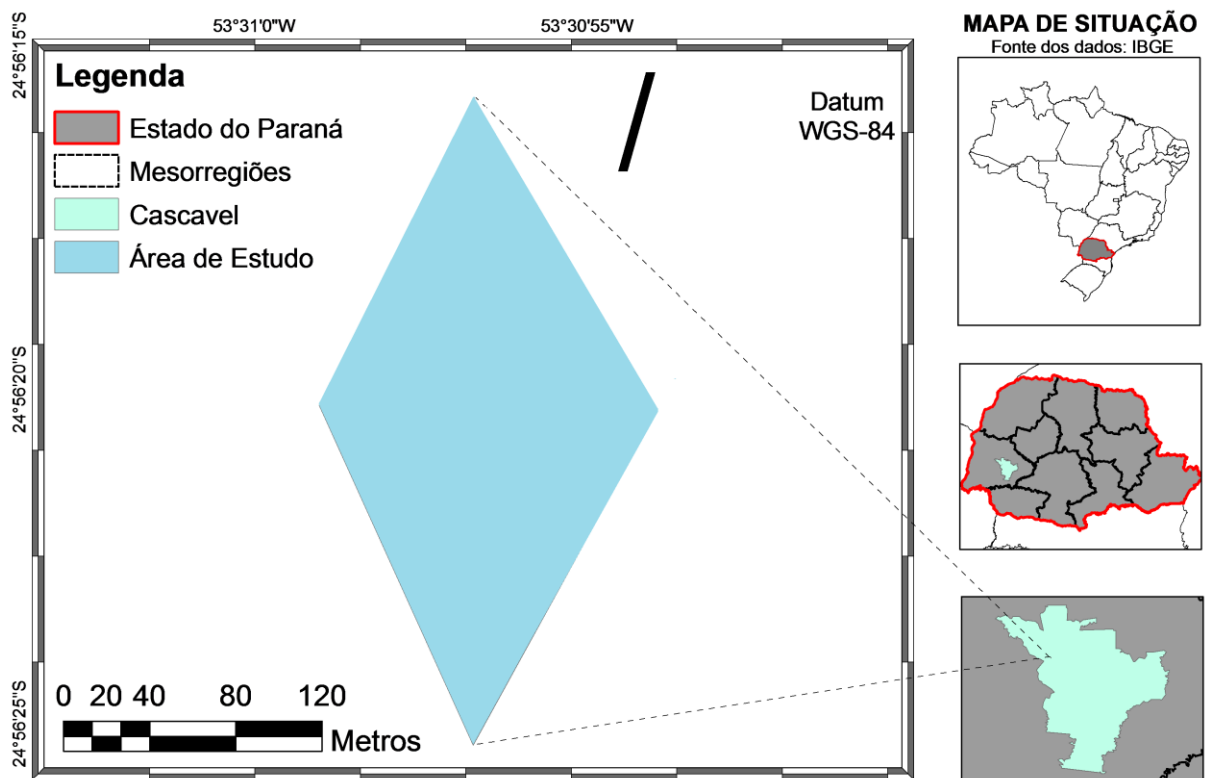


Figura 2 – Mapa da área experimental.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é temperado mesotérmico e super-úmido (cfa), com precipitação anual em torno de 1620 mm, chuvas bem distribuídas na

época de verão e temperatura do ar com média anual em torno de 21° C. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, textura argilosa a muito argilosa (Tabela 1), substrato basalto e relevo suave-ondulado (EMBRAPA, 2013).

Tabela 1 – Densidade de partículas e granulometria do solo nas três camadas analisadas no experimento

Camada m	Densidade de partículas Mg m ⁻³	Granulometria		
		Areia	Silte	Argila
		g kg ⁻¹		
0,0-0,1	2,56	91,6	412,4	496,0
0,1-0,2	2,67	40,2	296,0	663,8
0,2-0,3	2,70	26,4	252,4	721,2
Média	2,64	52,7	320,3	627,0

A área experimental foi dividida em quatro faixas, três delas de dimensões 7x100 m e uma de 79x100 m (Figura 1.1). Nessas faixas, foram estabelecidos quatro tratamentos, sendo que a maior área não foi alterada, representando o estado de compactação natural do sistema plantio direto. Com auxílio de um rolo compactador da marca Müller RTG2, com massa de cinco toneladas e dispositivo vibratório acionado, largura da roda compressora de 1,20 m e diâmetro de 1,35 m, largura da roda guia de 1,20 m e 0,96 m de diâmetro, foram estabelecidos os outros três tratamentos por meio de 1, 3 e 5 passadas do rolo compactador.

Semeadura do crambe e avaliação do rendimento de grãos e de óleo

A semeadura do crambe ocorreu em abril, no primeiro ano do experimento (2012), e em maio, no segundo ano (2013) e o ciclo do crambe estendeu-se até agosto e setembro, respectivamente, completando aproximadamente 110 dias (Tabela 2). Para a semeadura foi utilizada uma semeadora-adubadora de fluxo contínuo, modelo PST3 TATU/Marchesan® com nove linhas, equipada com sulcador tipo duplo-disco defasado para semente e deposição de adubo em superfície sem o uso de sulcador, para não descaracterizar os estados de compactação implementados com o rolo compactador.

Foram utilizadas sementes da cultivar FMS Brilhante, com espaçamento entre linhas de 0,3 m, profundidade de semeadura de 0,03 m e dosagem de 12 kg de semente por hectare. Para melhor avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e sua influência no rendimento de grãos e de óleo do crambe, não foi realizada adubação.

O proprietário da área experimental também cultivou a cultura do milho na área experimental, conforme cronologia apresentada na tabela 2, porém de fevereiro a abril de 2012 a área permaneceu em pousio.

Tabela 2 – Cronologia do experimento

Data	Atividade realizada
Fevereiro/2012	Instalação do Experimento
Fevereiro/2012	Coleta de amostras parcialmente deformadas e indeformadas de solo e Rp
Abril/2012	Semeadura do Crambe (Ano1)
Agosto/2012	Colheita do Crambe
Agosto/2012	Coleta de amostras indeformadas de solo
Setembro/2012	Plantio do Milho*
Janeiro/2012	Colheita do Milho
Abril/2013	Coleta de amostras parcialmente deformadas
Mai/2013	Semeadura do Crambe (Ano2)
Setembro/2013	Colheita do Crambe
Outubro/2013	Coleta de amostras indeformadas de solo e Rp

* No plantio do milho, foi realizada adubação de base de 605 kg ha⁻¹ de MAP (mono amônio fosfato) 10-51-00 e 968 kg ha⁻¹ de ureia e de cobertura de 484 kg ha⁻¹ de KCl e 1452kg ha⁻¹ de sulfato de amônia.

O rendimento de grãos do crambe foi avaliado numa área de 4 m² em cada ponto amostral. Após a colheita, todo o material foi trilhado manualmente. Foi realizada a limpeza das sementes, com auxílio de peneiras e um soprador elétrico. Após a limpeza, as amostras foram pesadas em uma balança semi-analítica com precisão de duas casas decimais. Os resultados da produção de grãos de crambe obtidos foram expressos em Mg ha⁻¹, com umidade corrigida para 13 %, onde a umidade dos grãos foi determinada pelo método gravimétrico com o uso de estufa de secagem com temperatura de 105 °C até obtenção de peso constante.

O teor de óleo foi determinado após trituração das sementes com um mixer portátil. Foram pesadas 5 g da amostra triturada e alocadas em cartucho de papel filtro, o qual foi introduzido em extrator tipo Soxhlet para determinação do teor de óleo. O método Soxhlet baseia-se na extração do óleo vegetal por repetidas lavagens com um solvente orgânico, sob-

refluxo em um vidro. Esse método foi realizado com base em procedimentos adaptados da norma analítica do Instituto Adolfo Lutz (Pregnoatto e Pregnoatto, 1985) no Laboratório A3Q LTDA, em Cascavel, PR.

CAPÍTULO 1

Variabilidade espacial do rendimento de grãos e de óleo do crambe associada a estados de compactação de um Latossolo argiloso

Resumo

O rendimento de grãos de culturas agrícolas é comprovadamente influenciado pelas características do solo e seu estado estrutural, que por sua vez são influenciados pelo manejo do solo. A correlação espacial entre atributos físicos do solo e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe tem sido pouco avaliada. Estudou-se neste trabalho a correlação espacial entre o espaço poroso do solo, a R_p e a D_s com o rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe. Para isto, foram gerados quatro estados de compactação em uma área de um hectare, em Cascavel/PR, por meio de passadas de um rolo compactador sobre a área. Foram selecionados 133 pontos amostrais georreferenciados, dispostos em uma grade regular, onde foram coletadas amostras para caracterização física do solo e colhido crambe para verificar o rendimento de grãos e o teor de óleo em dois anos consecutivos de estudo. Foi realizada análise geoestatística com o auxílio do software R. De maneira geral os atributos R_p , D_s e espaço poroso apresentaram estrutura de dependência espacial no tempo e nas diferentes camadas avaliadas. Após dois anos de cultivo do crambe, os valores de D_s aumentaram em todas as camadas, não evidenciando assim o potencial estruturante do sistema radicular desta cultura. Os resultados obtidos indicam que quando o crambe é submetido a estresse hídrico, o rendimento de grãos é reduzido, porém os grãos apresentam teor de óleo maior. Os valores de D_s de até $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ refletiram negativamente no rendimento de grãos e positivamente no teor de óleo do crambe. Houve correlação espacial inversa entre o rendimento de grãos e a D_s e microporosidade e direta entre o rendimento de grãos e a macroporosidade e R_p .

Palavras-chave: Cultivo energético; Estado estrutural; Correlações espaciais.

1.1 Introdução

A produtividade das culturas é influenciada pelas características do solo e o padrão espacial destas características pode ser causado por uma variação correspondente dos atributos do solo. Conhecer a fonte de variação na produtividade é fundamental para a realização de um manejo localizado do solo, haja vista que a variabilidade espacial de atributos do solo pode ter influência sobre a distribuição espacial da produtividade potencial da cultura (Mzuku et al., 2005).

Obter informações sobre a distribuição espacial dos atributos físicos do solo é útil para a definição de práticas de manejo e concepção de sistemas de irrigação ou de drenagem, já que as práticas de manejo do solo podem ter efeito positivo ou negativo sobre a qualidade do solo e conseqüentemente na produtividade (Ozgoz et al., 2013).

O manejo localizado do solo, com o objetivo de redução de custos, maximização da produtividade e uso eficiente de agroquímicos para minimizar os impactos ambientais, é possibilitado pela análise da variabilidade espacial dos atributos do solo. O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo é essencial para a tomada de decisões quanto às práticas de manejo, à aplicação de fertilizantes e ao sistema de irrigação (Abu e Malgwi, 2011) para fins de construção de um ambiente mais ecológico (Wang e Shao, 2013). A preocupação com a qualidade do solo e a construção de um ambiente ecológico tem levado produtores e pesquisadores à busca por culturas que melhorem a estrutura do solo e, de alguma forma, contribuam para a redução de impactos ambientais (Li et al., 2011).

A variabilidade espacial de atributos físicos de solo foi estudada por diversos autores. Dongli et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial da D_s , $K\theta_s$ e umidade do solo e concluíram que a densidade apresentou baixa variabilidade espacial, enquanto a $K\theta_s$ e a umidade apresentaram-se correlacionadas espacialmente. Ao avaliar a variabilidade espacial da R_p e da porosidade total (PT), Mion et al. (2012) verificaram que as variáveis apresentam fraca dependência espacial entre as amostras, enquanto Silva, Reichert e Reinert (2004) obtiveram dependência espacial moderada ao trabalhar com um Latossolo argiloso.

O crambe é uma Brassicaceae originária do Mediterrâneo, distribuída no Norte da África (Lalas et al., 2012), extensivamente plantada no México e Estados Unidos (Werner et al., 2013) e pode ser cultivado tanto em campos como sob árvores ou ao longo das bordas de outras culturas, apresentando desenvolvimento isolado sem crescimento contínuo (Lalas et al., 2012). É uma cultura de inverno, facilmente adaptável à rotação de culturas, com sistema

radicular vigoroso com grande potencial estruturante do solo e adaptabilidade a solos de baixa fertilidade, baixo custo de produção, tolerante à seca e geadas, e apresenta elevado teor de óleo (Jasper et al., 2010b).

A produção média do crambe gira em torno de 1,5 a 1,9 t ha⁻¹ e o teor de óleo das sementes é acima de 38%, considerada assim de grande qualidade para a produção de biodiesel (Martins et al., 2012). Essas características do crambe têm atraído grande número de pesquisadores interessados em culturas que garantam melhor rendimento de grãos e de óleo e que seja alternativa viável de cultivo de inverno.

Diversos trabalhos avaliaram a variabilidade espacial, porém poucos estudos, como os de Vieira et al. (2012a) e Martins et al. (2012), têm verificado a influência da variabilidade espacial de atributos físicos do solo no rendimento de grãos e de óleo da cultura do crambe. Embora haja vantagens apresentadas pela cultura do crambe, não há indicações na literatura a respeito de condições físicas do solo favoráveis ao aumento do rendimento de grãos e do teor de óleo do crambe. Há, contudo, indícios de que o teor de óleo não esteja diretamente associado ao rendimento de grãos (Lunelli et al., 2013).

O objetivo deste estudo foi verificar a correlação espacial entre a D_s, R_p, porosidade do solo e o rendimento de grãos e de óleo da cultura do crambe.

1.2 Material e métodos

1.2.1 Estabelecimento dos tratamentos, malha experimental e coleta de amostras do solo

Os tratamentos configurados foram: 0P – sem passadas do rolo compactador (estado de compactação natural do sistema plantio direto), 1P – uma passada do rolo compactador, 3P – três passadas do rolo compactador e 5P – cinco passadas do rolo compactador (Figura 1.1). A umidade gravimétrica, obtida pelo método da secagem em estufa (EMBRAPA, 1997) nos respectivos tratamentos e camadas, é apresentada na tabela 1.1. Para determinação da umidade gravimétrica, foram coletadas 5 amostras aleatórias em cada tratamento.

Tabela 1.1 – Umidade gravimétrica (%) no momento da passagem do rolo compactador nas três camadas e quatro tratamentos (média de cinco repetições)

Tratamento	Camada		
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
0P	35,5	38,9	40,8
1P	35,0	37,0	38,1
3P	34,8	36,7	37,3
5P	32,6	35,7	38,3

0P: sem passadas do rolo compactador, 1P: uma passada do rolo, 3P: três passadas do rolo e 5P: cinco passadas do rolo.

A malha experimental, demarcada com um GPS Garmim60CSx, foi composta por 133 pontos, dos quais 81 deles são separados por uma distância mínima de 11 m, e uma sub-malha com maior densidade amostral com 72 pontos separados por uma distância mínima de 5,5 m (alguns dos pontos dessa sub-malha fazem parte da malha maior), como ilustra a figura 1.1.

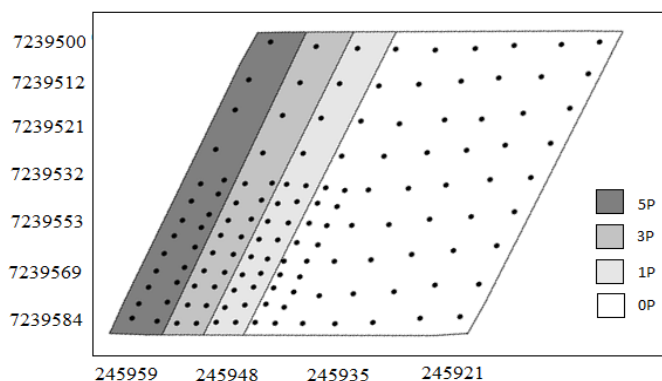


Figura 1.1 – Malha amostral apresentando a distribuição dos pontos georreferenciados e os estados de compactação/tratamentos: 0P: sem passadas do rolo compactador, 1P: uma passada do rolo, 3P: três passadas do rolo e 5P: cinco passadas do rolo.

As coletas de amostras indeformadas foram realizadas nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, considerando a profundidade intermediária da camada visada, utilizando anéis de dimensões médias de 0,049 m de altura e 0,056 m de diâmetro. Foram coletadas amostras em duplicata em cada camada, a fim de obter amostras representativas, considerando a grande dispersão dos atributos físicos e prevenindo perda de amostras durante a realização dos procedimentos laboratoriais.

1.2.2 Determinações físicas do solo

Para a caracterização física do solo, foram determinados os seguintes atributos e/ou propriedades: granulometria, densidade de partículas (D_p), D_s , umidade do solo, macroporosidade (macro), microporosidade (micro), PT e R_p .

A análise granulométrica foi realizada com o método da pipeta e a D_p foi obtida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Para determinação da PT, utilizou-se a equação 1.1:

$$PT = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \times 100 \quad (\text{Equação 1.1})$$

em que PT: porosidade total [%], D_s : densidade do solo [Mg m^{-3}] e D_p : densidade de partículas [Mg m^{-3}].

A micro foi determinada quantificando a água retida na amostra após submissão à tensão de 0,6 m de coluna de água em coluna de areia, conforme metodologia proposta por Reinert e Reichert (2006). A macro foi calculada pela diferença entre PT e micro.

A D_s foi determinada pelo método do cilindro, descrito em EMBRAPA (1997), e calculada pela equação 1.2:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Equação 1.2})$$

em que D_s : densidade do solo [Mg m^{-3}], M_s : massa de solo seco [Mg], V : volume do solo [m^3].

As determinações da R_p foram realizadas com auxílio de um penetrômetro automático, com armazenamento eletrônico de dados, do tipo Penetrolog – PLG 1020 (Falker). As leituras foram registradas verticalmente a cada cm até a profundidade de 0,3 m. Foram feitas cinco repetições por ponto amostral, com a determinação das seguintes variáveis: R_p média nas camadas de: 0,0-0,1 m (R_{p1}), 0,1-0,2 m (R_{p2}) e 0,2-0,3 m (R_{p3}).

No momento da determinação da R_p , foram coletadas amostras parcialmente deformadas de solo para determinação da umidade gravimétrica, seguindo a metodologia descrita em EMBRAPA (1997).

1.2.3 Análise descritiva e espacial

A análise descritiva dos dados incluiu análise do máximo, mínimo, média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, quartis, curtose, simetria e normalidade dos dados, enquanto uma análise gráfica foi feita pelos gráficos de dispersão, de barras, postplot e boxplot, com auxílio do software R (R Core Team, 2014) e dos pacotes moments (Komsta e Novomestky, 2012) e e1071 (Meyer et al., 2014). Os resultados da análise descritiva são apresentados no Anexo B.

A análise geoestatística foi realizada com auxílio dos pacotes geoR (Diggle e Ribeiro Jr., 2007), splancs (Rowlingson e Diggle, 2014) e MASS (Venables e Ripley, 2002) do software R (R Core Team, 2014). Os estimadores de semivariância de Matheron (Matheron, 1962) e New1 (Li e Lake, 1994) foram utilizados para avaliar a existência e forma da dependência espacial entre as amostras.

O estimador clássico de Matheron da função semivariância definida na equação 1.3 é da forma:

$$\hat{\gamma}_M(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (\text{Equação 1.3})$$

em que $\hat{\gamma}$: valor da semivariância estimada pelo estimador de Matheron, $N(h)$: número de pares separados por uma distância h , $Z(s)$: valor da variável Z no ponto s .

O estimador de semivariância New1 é apresentado pela equação 1.4:

$$\hat{\gamma}_{N1}(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{j \in D_{i,h}} [Z(s_i) - Z(s_j)]^2 \right\} \quad (\text{Equação 1.4})$$

em que $\hat{\gamma}_{N1}$: valor da semivariância estimada pelo estimador New1, n : número de pontos amostrais na área toda, $D_{i,h}$: conjunto indexado dos valores da variável Z em pontos de uma janela móvel bi-dimensional de área $\Delta_{i,h}$ e tamanho h , centrada no bloco i , excluindo o ponto s_i e m : número de pares em $D_{i,h}$.

Após a construção dos semivariogramas experimentais, foram realizados os ajustes de modelos teóricos, validados pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). Assim, foram determinados os parâmetros do semivariograma para cada variável regionalizada em estudo. O *cutoff* utilizado foi de 50% da distância máxima entre os pontos amostrais.

Para determinar o grau de dependência (*GD*) entre as amostras, foi utilizada a equação 1.5:

$$GD = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \times 100 \quad (\text{Equação 1.5})$$

em que *GD*: grau de dependência, C_1 : variância estruturada, C_0 : efeito pepita e $C_0 + C_1$: patamar.

De acordo com Mello et al. (2008), a classificação adotada é $GD < 25\%$ (fraca dependência espacial); $25\% \leq GD \leq 75\%$ (dependência espacial moderada) e $GD > 75\%$ (forte dependência espacial).

Semivariogramas cruzados foram construídos para avaliar a existência de correlação espacial entre os atributos físicos do solo e o rendimento de grãos do crambe. O semivariograma cruzado é obtido pela equação 1.6:

$$\hat{\gamma}_{1,2}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum^{N(h)} \{ [Z_1(s) - Z_1(s+h)][Z_2(s) - Z_2(s+h)] \} \quad (\text{Equação 1.6})$$

em que $\hat{\gamma}_{1,2}$: valor da semivariância cruzada entre as variáveis Z_1 e Z_2 , $N(h)$: número de pares separados por uma distância h , s : ponto amostral georreferenciado.

1.3 Resultados e discussão

A R_p e a macro são as variáveis que apresentam os maiores CVs em todas as épocas e camadas (Tabela 1.2). A alta variabilidade da macro ocorre por este ser o atributo mais afetado do espaço poroso quando o solo sofre deformação. A alta variabilidade da R_p decorre do fato deste atributo físico do solo ser dependente do estado de compactação e principalmente da umidade do solo, que é variável no tempo em função dos ciclos de umedecimento e secagem. Ao trabalhar com D_s e R_p , Cavalcante et al. (2011) também obtiveram os maiores valores de CV para a R_p . De acordo com Dongli et al. (2010), a alta variabilidade dos atributos físicos e hidráulicos do solo pode trazer incertezas quanto ao manejo adequado do solo.

Os CVs da Ds são abaixo de 10%, exceto na primeira camada após a segunda colheita do crambe, indicando baixa variabilidade (Tabela 1.2). Estes resultados são similares aos obtidos por Dongli et al. (2010).

As variáveis Ds e PT não apresentaram dependência espacial na primeira camada em estudo, após a primeira colheita do crambe (Ago/2012), assim como a PT após a segunda colheita do crambe (Out/2013) na camada de 0,1-0,2 m (Tabela 1.2). Nas demais camadas e épocas, todos os atributos do solo apresentaram estrutura de dependência espacial (fraca, moderada ou alta).

Na camada de 0,0-0,1 m, a dependência espacial variou de fraca a moderada (Tabela 1.2). Isso pode ter ocorrido provavelmente devido ao alto teor de matéria orgânica nesta camada, aliado ao fato desta camada ser constantemente revolvida pelos mecanismos sulcadores da semeadora-adubadora na implantação das culturas, pois de acordo com Genro Junior et al. (2009) cerca de 30% da área agrícola é mobilizada por estes mecanismos nesta camada. No presente experimento, estes mecanismos foram do tipo duplo disco defasado; portanto, acredita-se que o solo tenha sofrido revolvimento, eliminando assim uma possível estrutura de dependência entre as amostras destes atributos. Na camada de 0,1-0,2 m a dependência espacial variou de fraca a alta, e na última camada (onde houve menor influência das passadas do rolo compactador) a dependência foi de moderada a alta.

A Ds apresentou dependência espacial moderada na maioria dos casos (Tabela 1.2). Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Ozgoz et al. (2013), quando os parâmetros do semivariograma obtidos pelos autores são inseridos na equação do *GD* apresentada neste trabalho.

Tabela 1.2 – Estatística descritiva e espacial dos atributos físicos do solo

Época	Variável	Média	CV	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	GD	FD
Camada 0,0 – 0,1 m									
Fev/2012	Ds	1,07	6,07	Gaussiano	0,0026	0,0045	30,00	42,22	Moderada
	macro	14,28	18,34	Exponencial	40,603	40616,4	189,00	0,033	Fraca
	micro	43,77	5,00	Exponencial	3,37	5,30	22,32	36,42	Moderada
	PT	58,05	4,38	Gaussiano	4,15	6,90	29,98	39,86	Moderada
	Rp	2,08	26,70	Esférico	0,19	0,48	179,47	60,42	Moderada
Ago/2012	Ds	1,07	6,02	Epp	0,0042	-	-	-	-
	macro	13,92	21,77	Esférico	8,16	9,10	14,51	10,33	Fraca
	micro	44,26	7,15	Esférico	9,04	10,00	16,32	9,60	Fraca
	PT	58,18	4,33	Epp	6,34	-	-	-	-
Out/2013	Ds	1,12	11,19	Esférico	0,013	0,015	30,00	16,13	Fraca
	macro	13,65	50,41	Esférico	40,66	46,58	17,36	12,71	Fraca
	micro	41,89	13,27	Esférico	26,89	31,09	16,90	13,51	Fraca
	PT	55,54	19,60	Exponencial	80,18	116,27	10,00	31,04	Moderada
	Rp	2,90	18,82	Gaussiano	0,26	0,41	85,33	36,58	Moderada
Camada 0,1 – 0,2 m									
Fev/2012	Ds	1,10	5,39	Exponencial	0,0027	0,0041	30,00	34,15	Moderada
	macro	17,27	13,66	Esférico	4,93	5,40	15,37	8,704	Fraca
	micro	41,47	6,22	Gaussiano	4,58	13,06	74,29	64,93	Moderada
	PT	58,74	3,79	Gaussiano	3,51	5,33	17,62	34,15	Moderada
	Rp	2,65	17,39	Esférico	0,12	0,22	30,00	45,45	Moderada
Ago/2012	Ds	1,12	5,09	Gaussiano	0,0019	0,0065	30,00	70,77	Moderada
	macro	17,75	12,49	Gaussiano	4,35	7,50	118,66	42,00	Moderada
	micro	40,29	5,65	Gaussiano	5,39	31,2	156,36	82,72	Alta
	PT	58,04	3,68	Exponencial	2,6	15,96	263,08	83,71	Alta
Out/2013	Ds	1,18	10,56	Gaussiano	0,015	0,0015	30,00	6,25	Fraca
	macro	11,39	40,10	Esférico	16,66	22,07	38,16	24,51	Fraca
	micro	38,38	13,31	Esférico	21,66	25,95	16,21	16,53	Fraca
	PT	49,76	12,59	Epp	38,94	-	-	-	-
	Rp	4,30	13,66	Exponencial	0,22	0,41	30,00	46,34	Moderada
Camada 0,2 – 0,3 m									
Fev/2012	Ds	1,05	5,58	Gaussiano	0,0018	0,0046	30,00	60,87	Moderada
	macro	16,73	14,70	Gaussiano	4,57	10,29	99,58	55,59	Moderada
	micro	44,19	8,14	Gaussiano	6,45	24,71	69,70	73,90	Moderada
	PT	60,92	3,58	Exponencial	2,95	37,44	756,48	92,12	Alta
	Rp	2,12	14,88	Esférico	0,05	0,11	30,00	54,54	Moderada
Ago/2012	Ds	1,09	5,55	Exponencial	0,0018	0,0045	30,00	60,00	Moderada
	macro	17,06	13,58	Esférico	2,98	6,42	77,17	52,58	Moderada
	micro	42,31	6,05	Exponencial	3,37	30287,3	482626	99,99	Alta
	PT	59,37	3,80	Exponencial	3,33	7,43	670,02	55,18	Moderada
Out/2013	Ds	1,14	7,46	Gaussiano	0,0012	0,0101	30,00	88,12	Alta
	macro	11,09	31,66	Esférico	6,96	15,5	87,87	55,09	Moderada
	micro	40,96	6,47	Gaussiano	3,68	13,19	65,33	72,10	Moderada
	PT	51,40	14,2	Gaussiano	13,11	42,73	63,63	69,32	Moderada
	Rp	3,72	16,17	Esférico	0,21	0,40	30,00	47,50	Moderada

Epp: Efeito pepita puro; CV: coeficiente de variação; C_0 : efeito pepita; C_0+C_1 : patamar; a : alcance; GD: grau de dependência; FD: faixa de dependência; Ds: densidade do solo; macro: macroporosidade; micro: microporosidade; PT: porosidade total; Rp: resistência do solo à penetração.

A Ds aumentou nas três camadas em estudo ao longo do tempo, provavelmente devido à ação das máquinas e implementos agrícola utilizados para o plantio e colheita. O efeito da

compactação gerada pelo rolo compactador sobre a Ds não ficou evidente. Também não se observa um efeito positivo das raízes do crambe sobre a Ds (Figura 1.2).

Comparando as figuras 1.2 (Fev/2012) e 1.7 (b), observa-se que nos locais de menor densidade ocorreu maior rendimento de grãos. Observa-se também que nos locais onde ocorre maior Ds em Out/2013 (Figura 1.2), há menor rendimento de grãos do crambe (Figura 1.7c).

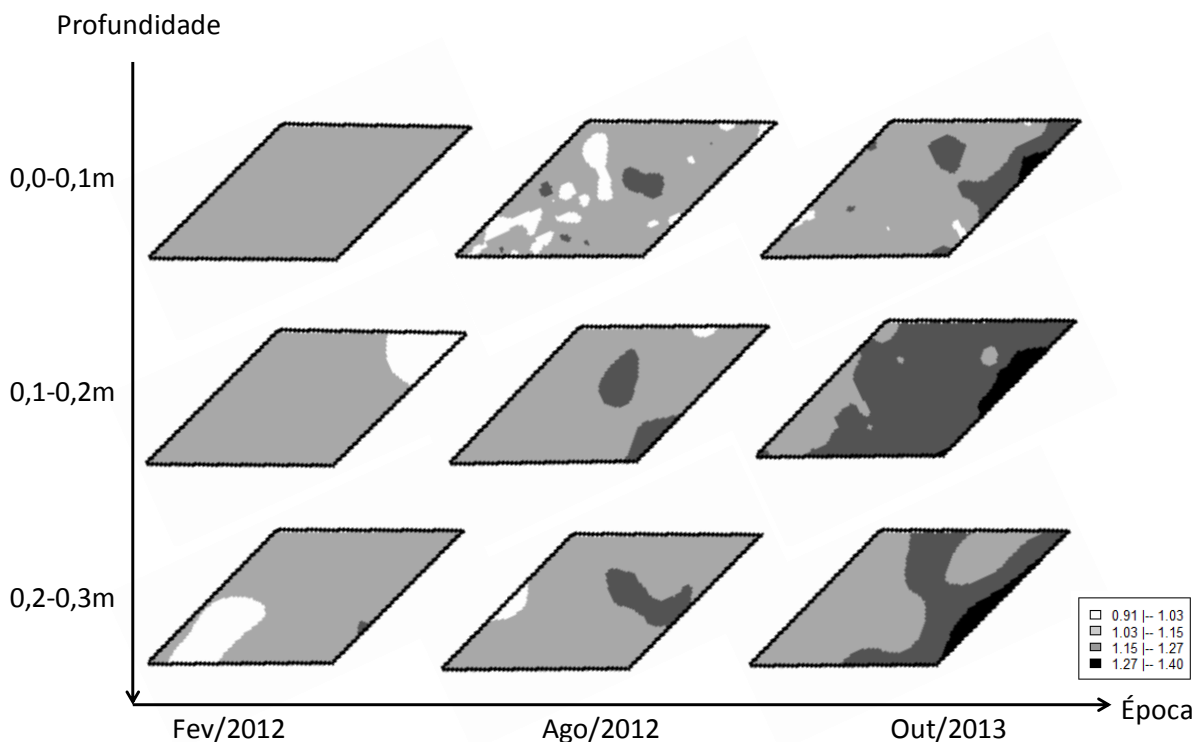


Figura 1.2 – Mapas de superfície da densidade do solo (Mg m^{-3}) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

A PT não apresentou dependência espacial entre as amostras na segunda coleta (Ago/2012), na camada de 0,0-0,1 m, e na terceira coleta (Out/2013), na camada de 0,1-0,2 m (Tabela 1.2). No entanto, foram construídos os mapas de superfície, para fins de avaliar o comportamento da PT nestas épocas e camadas (Figura 1.3). Na camada de 0,0-0,1 m a dependência espacial da PT foi fraca ou moderada, enquanto Wang e Shao (2013) encontraram dependência espacial forte entre as amostras de PT na camada de 0,0-0,5 m, provavelmente pelo fato de não ter havido compactação adicional em seu experimento. Observa-se que a PT diminuiu ao longo do tempo, nas três camadas avaliadas.

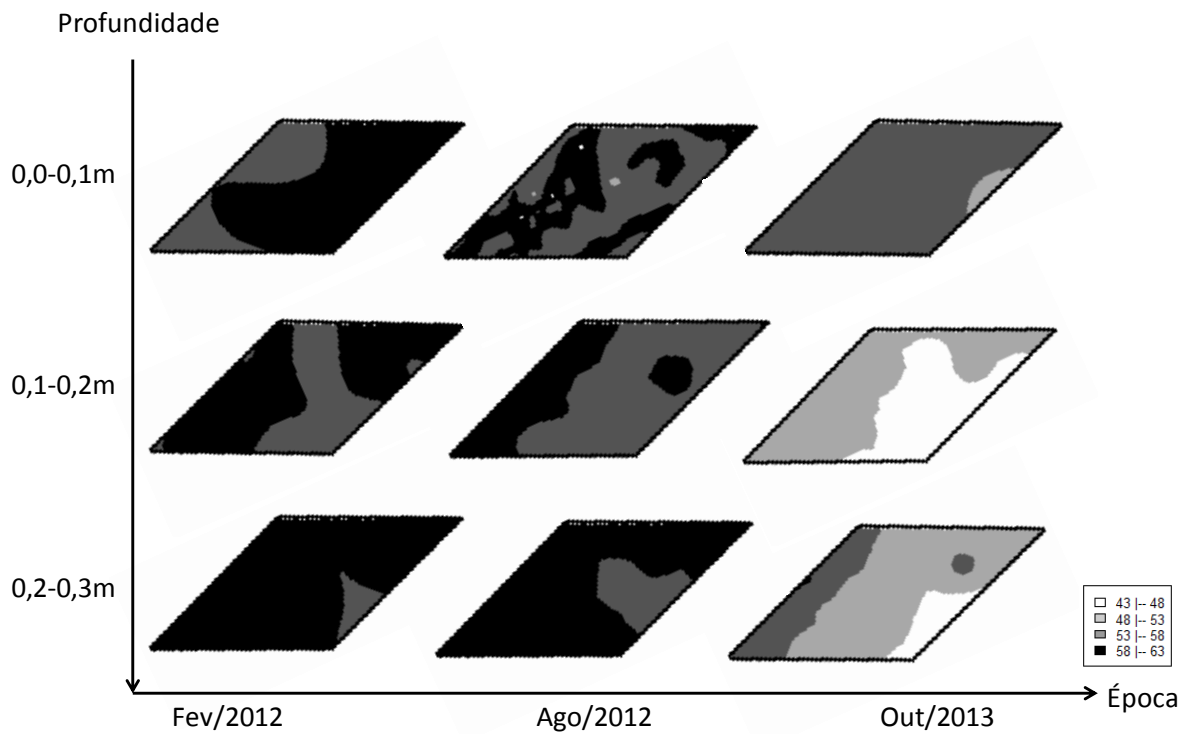


Figura 1.3 – Mapas de superfície da porosidade total (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Na camada de 0,0-0,1 m observa-se o efeito da compactação na macro, na primeira coleta de amostras (Fev/2012), já que a macro diminui no sentido da menor para maior compactação (região direita para esquerda dos mapas na figura 1.4). Nas demais camadas e épocas, esse efeito não é observado. Assim como a PT, a macro também diminuiu ao longo do tempo em todas as camadas avaliadas. Isto repercutiu na redução do rendimento de grãos do crambe do primeiro para o segundo ano de estudo.

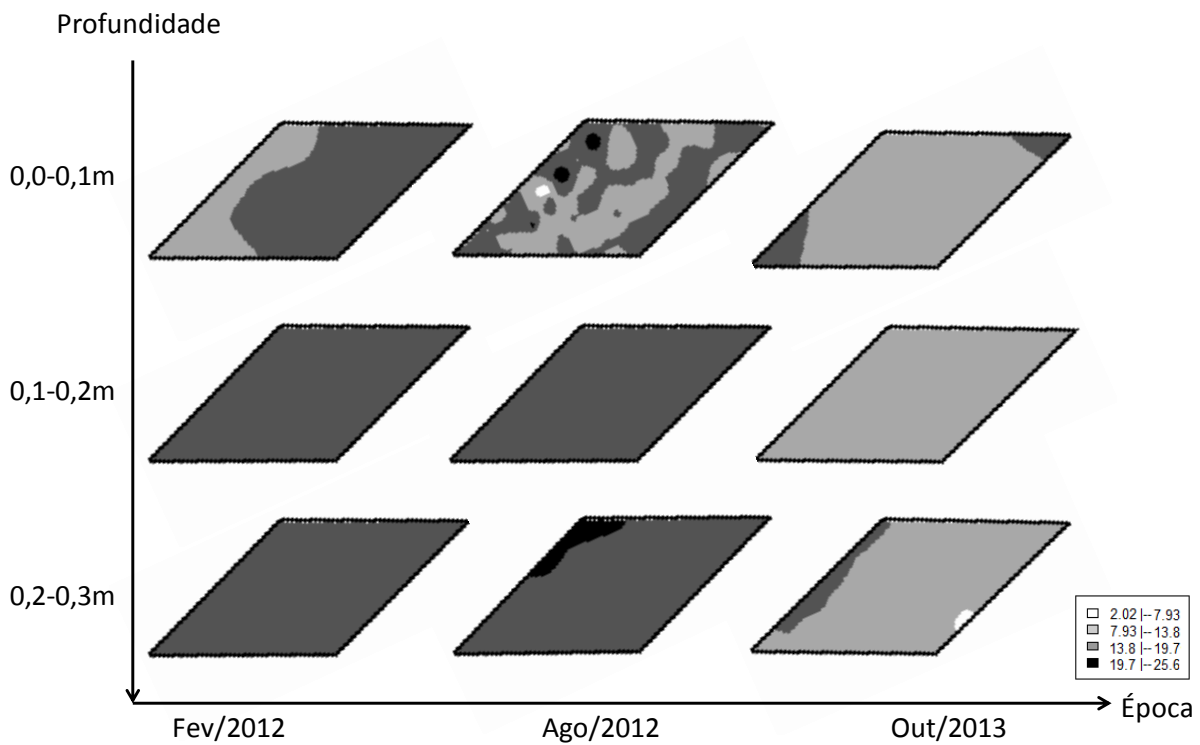


Figura 1.4 – Mapas de superfície da macroporosidade (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Em estudo de Raczkowski et al. (2012), a macro e a micro não foram afetadas pelo manejo. No presente estudo, cinco passadas do rolo compactador foram suficientes para aumentar o volume de microporos nas três camadas, que diminui gradativamente no sentido do maior para o menor número de passadas do rolo (da esquerda para direita nos mapas da figura 1.5) nas três camadas e épocas avaliadas.

O volume de microporos diminuiu ao longo do tempo (Figura 1.5) e, nos locais onde a micro foi maior, houve maior rendimento de grãos (Figura 1.7b, c), ao se analisar os dois momentos em que o crambe foi colhido.

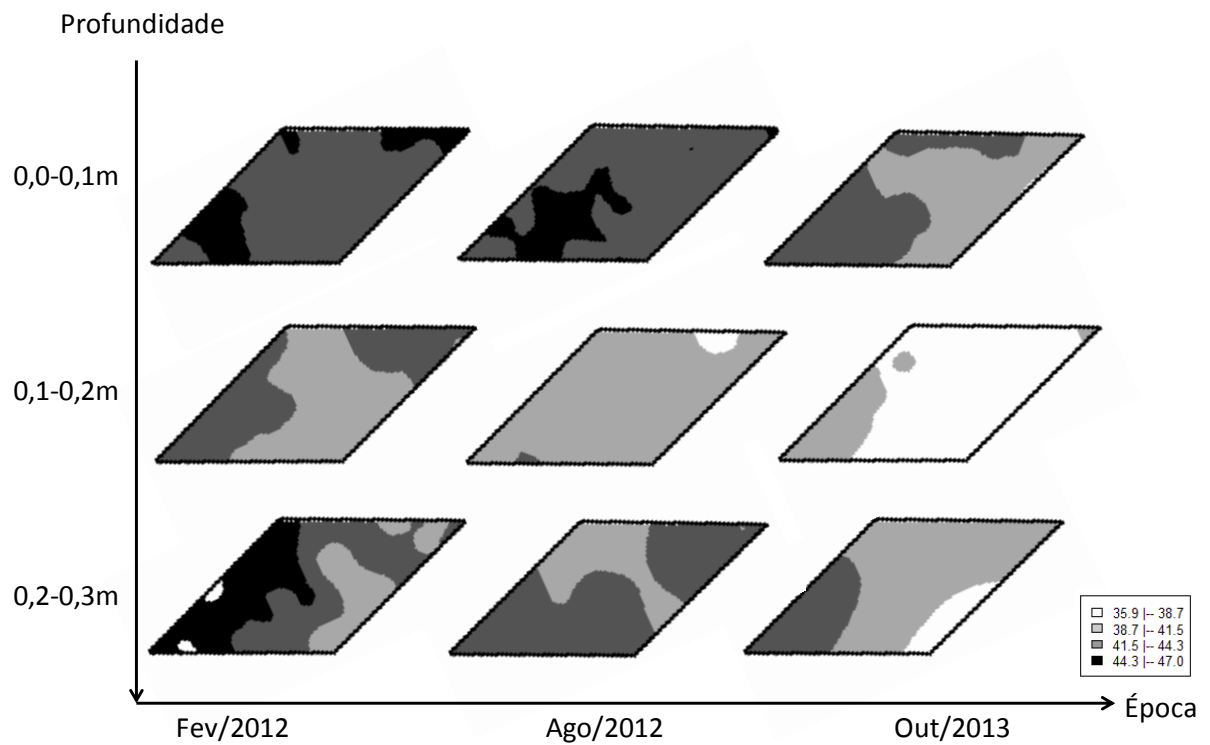


Figura 1.5 – Mapas de superfície da microporosidade (%) nas três épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Houve aumento na R_p ao longo do tempo em todas as camadas, sendo que na segunda camada do solo este efeito foi mais significativamente que nas demais (Figura 1.6). A dependência espacial entre os dados de R_p foi moderada em todas as coletas e camadas do solo. Estes resultados são compatíveis com os obtidos por Silva, Reichert e Reinert (2004) e Vieira et al. (2012a) ao trabalharem com Latossolo argiloso.

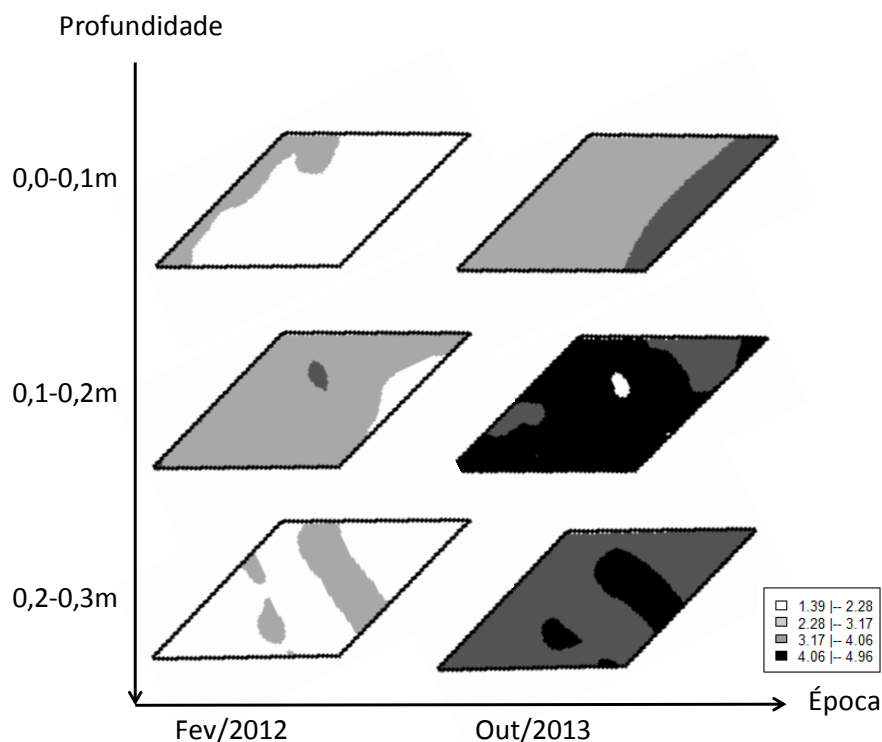


Figura 1.6 – Mapas de superfície da resistência do solo à penetração (MPa) nas duas épocas, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m (Umidade gravimétrica do solo, vide tabela 1.1).

Nos locais onde o rendimento de grãos foi maior o teor de óleo foi menor (Figura 1.7), o que indica uma relação inversa entre as duas variáveis, possivelmente resultante da mudança na relação fonte:dreno, pois as espécies, de maneira geral, quando submetidas a uma condição de stress (alta resistência hídrica e/ou nutricional), aceleram seu ciclo de desenvolvimento para garantir a sobrevivência da espécie. Nesse sentido, conforme Duarte e Peil (2010), a matéria seca é distribuída entre os órgãos de uma planta como resultado final de um conjunto de processos metabólicos e de transporte, que regem o fluxo de assimilados através de um sistema fonte:dreno, que, segundo os autores, é representado pelos órgãos fonte (responsáveis pela produção de assimilados a partir da fotossíntese), que são representados principalmente pelas folhas e os órgãos de reserva (ou drenos) onde os assimilados são armazenados, representados pelas raízes, meristemas e frutos das plantas.

Além disso, em resposta a alterações no balanço fonte:dreno ocorrem mudanças nos padrões de distribuição que levam a compensação ou prejuízos para cultura (Souza et al., 2013). Neste estudo, nos locais de menor rendimento de grãos, os grãos apresentaram maior teor de óleo para garantir a sobrevivência da espécie, isto é, menor rendimento de grãos, mas grãos com maior qualidade para perpetuação da espécie. Champolivier e Merrien (1996)

também comentam o efeito da relação fonte:dreno no teor de óleo nas sementes de canola quando submetidas a estresse hídrico. Segundo os autores, o teor de óleo foi inverso à concentração de proteína, já que a falta de água reduziu o número de sementes por planta, porém não afetou a quantidade de glucosinolatos nos órgãos vegetativos, o que permitiu que o teor de óleo fosse inverso à concentração de proteína. Meijer, Mathijssen e Kreuzer (1999), por sua vez, testaram os efeitos de alterações na relação fonte:dreno na cultura do crambe e os autores observaram que o rendimento de grãos e o teor de óleo são características afetadas por aquela relação.

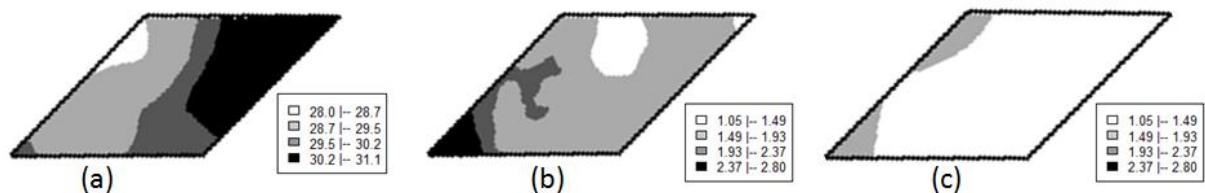


Figura 1.7 – Teor de óleo (%) no ano de 2012(a) e rendimento de grãos (Mg ha^{-1}) nos anos 2012(b) e 2013(c).

Existe uma correlação espacial inversa entre o rendimento de grãos do crambe e a Ds, nos dois anos do experimento, nas três camadas estudadas, exceto na primeira camada na coleta de Ago/2012 (Figura 1.8). Vieira et al. (2012a) encontraram resultados diferentes, ao avaliar visualmente mapas de rendimento de grãos do crambe, Ds e Rp, sendo que os autores concluíram que a Ds e a Rp não apresentam relação significativa com o rendimento de grãos. Quanto ao teor de óleo do crambe, na primeira camada, sua relação com a Ds é inversa, já nas camadas de 0,1-0,2m e 0,2-0,3m, ocorre correlação espacial direta entre o teor de óleo e a Ds.

Houve correlação espacial direta entre o teor de óleo e a macro e o rendimento de grãos do crambe e a macro em todas as camadas do solo nos dois anos de coleta (Figura 1.9).

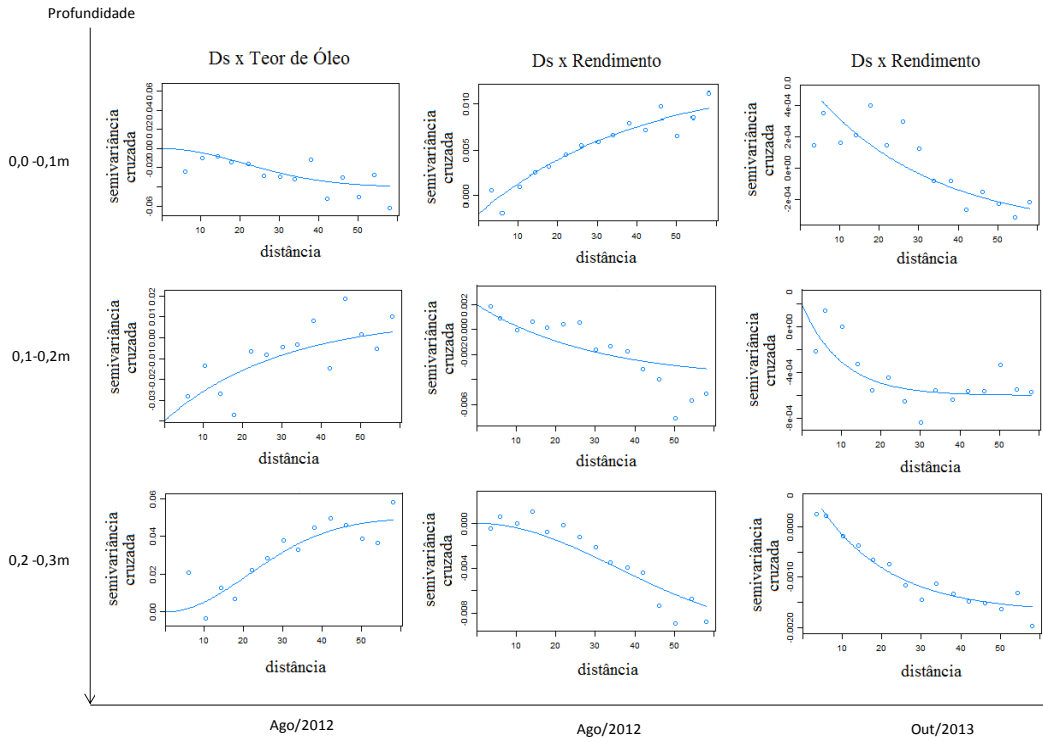


Figura 1.8 – Semivariogramas cruzados entre a Ds e teor de óleo e Ds e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas.

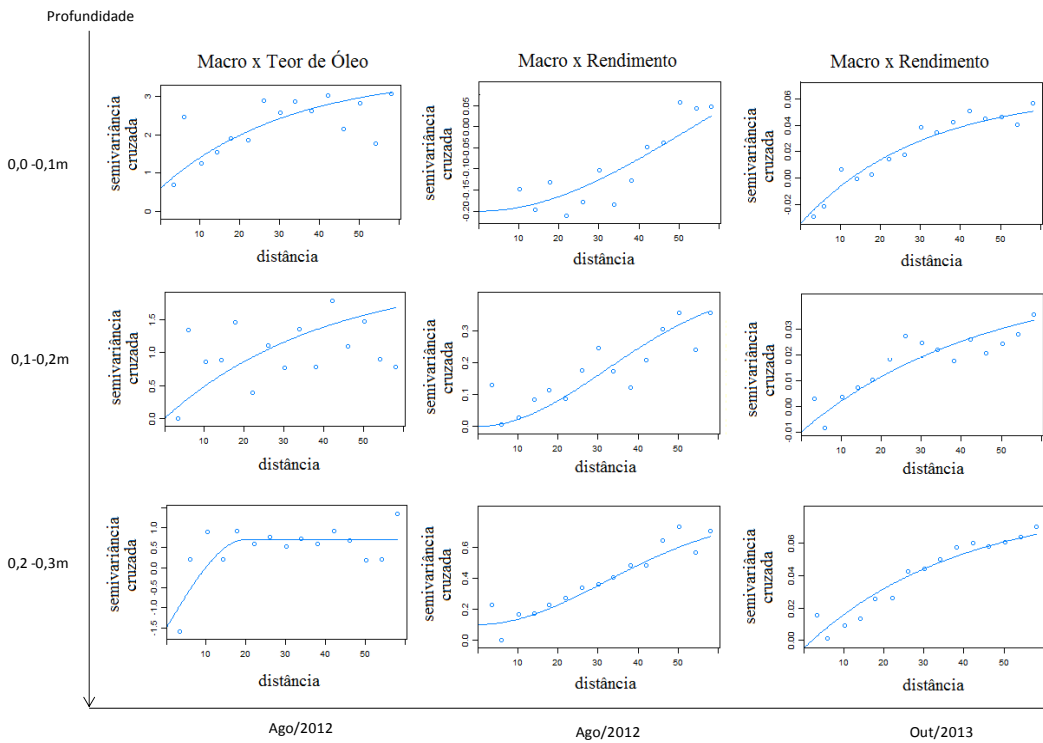


Figura 1.9 – Semivariogramas cruzados entre a macro e teor de óleo e macro e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas.

A micro está inversamente correlacionada com o rendimento do crambe e com o teor de óleo do crambe (Figura 1.10).

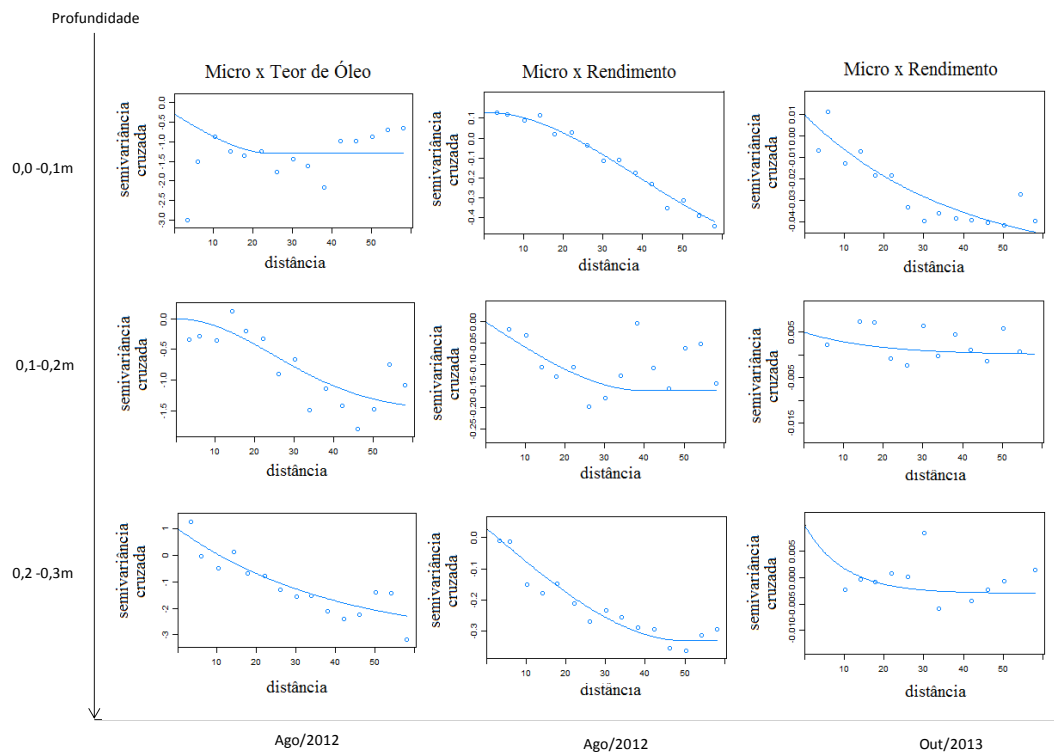


Figura 1.10 – Semivariogramas cruzados entre a micro e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas.

Nas primeiras camadas em estudo, a Rp e o teor de óleo apresentam correlação espacial inversa, porém, na terceira camada, apresentam correlação direta (Figura 1.11). O inverso ocorre com a Rp e o rendimento de grãos do crambe, que nas primeiras camadas apresentam correlação espacial direta, enquanto na terceira eles têm correlação espacial inversa. De acordo com Chancellor (1971), uma pequena compactação pode ser benéfica às plantas, pois favorecem a ascensão capilar da água no solo, atendendo de forma mais eficiente às demandas evapotranspirativas das plantas, embora Reichert et al. (2009a) afirmem que a compactação do solo acima de níveis críticos (D_s maior que $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos argilosos), afete propriedades ecológicas do solo como fluxo de ar e água além de afetar o crescimento das raízes e rendimento de grãos.

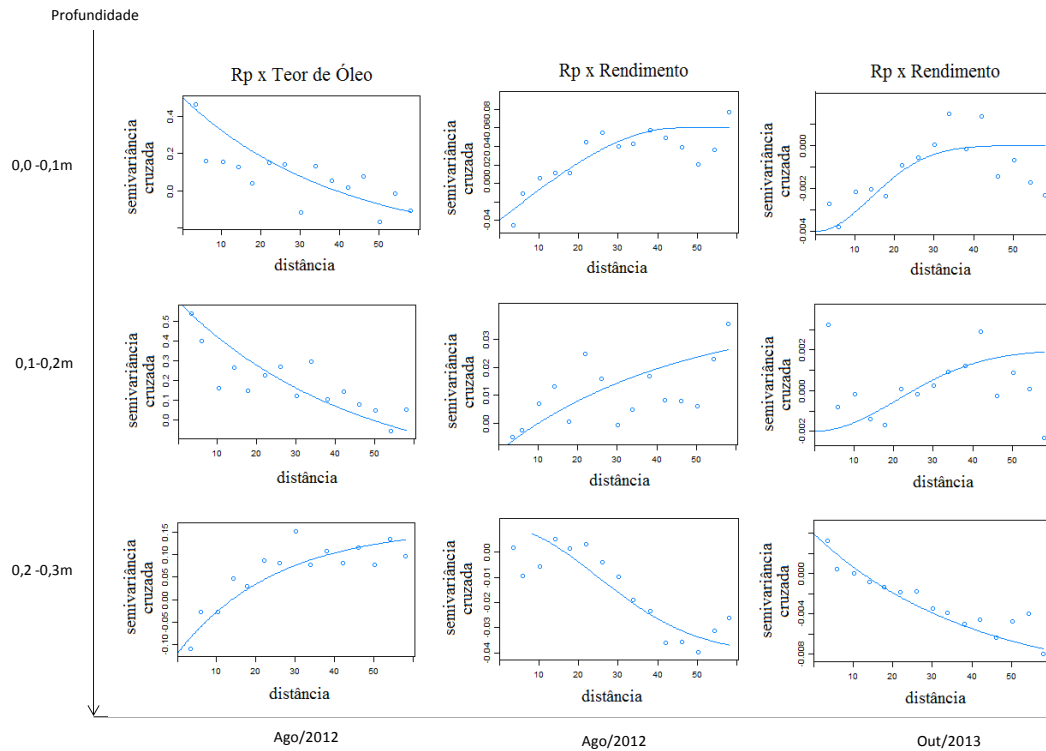


Figura 1.11 – Semivariogramas cruzados entre a Rp e rendimento de grãos do crambe nos anos de 2012 e 2013, nas três camadas analisadas.

1.4 Conclusões

- Após dois anos de cultivo do crambe, os valores de Ds e Rp aumentaram e os valores da PT, macro e micro diminuíram em todas as camadas, não evidenciando, neste estudo o potencial estruturante do sistema radicular desta cultura.
- O aumento na Ds e da Rp, causado pela compactação adicional do solo pelo rolo compactador altera a relação fonte:dreno do crambe, repercutindo em menor rendimento de grãos, porém produção de grãos com maior qualidade que possuem maior teor de óleo.

CAPÍTULO 2

Implicações de estados de compactação em atributos físico-hídricos de um Latossolo argiloso e no rendimento de grãos e de óleo do crambe

Resumo

A compactação do solo causada por tráfego de máquinas agrícolas em áreas cultivadas sob sistema plantio direto afetam a infiltração da água e o movimento de ar, muitas vezes com reflexos negativos no rendimento de grãos. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de quatro estados de compactação, sendo três estados gerados pela passagem de um rolo compactador (1, 3 e 5 passadas) e uma área manejada sob sistema plantio direto sem passadas do rolo compactador, nos atributos densidade e porosidade do solo, permeabilidade do solo ao ar e condutividade hidráulica do solo saturado e no rendimento de grãos e no teor de óleo da cultura do crambe. As avaliações de solo foram realizadas nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, num Latossolo argiloso, no município de Cascavel/PR. O delineamento experimental constou de um experimento em faixas, analisado por meio de análise de variância, teste Tukey e análise de regressão. Três e cinco passadas do rolo compactador proporcionaram densidades do solo, respectivamente, entre os valores 1,10 – 1,15 e 1,15 – 1,23 Mg m⁻³. Estas faixas de densidade reduziram o volume de macroporos e a condutividade hidráulica do solo saturado. O rendimento de grãos do crambe foi afetado pela redução do volume de macroporos e da condutividade hidráulica do solo saturado e o teor de óleo do crambe aumentou com o aumento da densidade do solo e redução da condutividade hidráulica do solo saturado.

Palavras-chave: condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade do solo ao ar, porosidade do solo.

2.1 Introdução

Para possibilitar às plantas boas condições de crescimento, é necessário que o solo apresente, dentre outras condições, aeração adequada para troca gasosa e boa retenção e disponibilidade adequada de água (Reichert et al., 2009a). A capacidade que o solo possui de promover a troca de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera de maneira adequada, afeta o crescimento de plantas (Alaoui, Lipiec e Gerke, 2011).

O conhecimento dos valores de atributos físicos do solo e como esses influenciam a aeração e a infiltração de água do solo é de fundamental importância para a tomada de decisões, quando se objetiva o manejo adequado do solo visando aumento da produtividade. Dentre os atributos utilizados para avaliar o movimento de ar e água no solo, estão a K_a (Juan, Pute e Xining, 2013), a $K\theta_s$ (Swamee, Rathie e Ozelim, 2012), a D_s e a porosidade do solo (Zhang, Grip e Lövdahl, 2006).

A compactação do solo afeta negativamente o crescimento de raízes (Bejarano et al., 2010), diminui a capacidade de infiltração de água e a translocação de nutrientes, resultando em uma pequena camada para ser explorada pelas raízes (Alameda e Villar, 2012). Pode-se considerar um solo compactado pela observação da redução da taxa de difusão de oxigênio, assim como pelo aumento da D_s e redução da porosidade de aeração (Alaoui e Helbling, 2006; Reinert et al., 2008).

Os efeitos da compactação podem afetar o rendimento de grãos das culturas, dependendo do tipo de solo, do teor de água, do nível de compactação e da espécie cultivada (Rodrigues et al., 2009).

De acordo com Reichert et al. (2009b), em um solo de textura argilosa com volume de macroporos inferior a 10% com densidade entre 1,25 e 1,3 $Mg\ m^{-3}$, há indícios de restrições ao crescimento radicular, e conseqüente redução da produtividade das culturas.

A área de solos cultivados sob Sistema Plantio Direto vem aumentando no Brasil, mas, a compactação do solo, que pode ocorrer devido à sua utilização, reduz a qualidade estrutural do solo, limitando o rendimento de grãos das culturas (Secco et al. 2009), devido à compactação do solo pela pressão imposta pelos pneumáticos das máquinas agrícolas. De acordo com Silva, Reinert e Reichert (2000), esse sistema apresenta tendência à compactação na camada de 0,07 – 0,15 m, o que pode ser verificado pelo aumento da densidade na camada.

Vários trabalhos têm avaliado o efeito da compactação do solo nos atributos físico-hídricos do solo que afetam o rendimento de grãos, como o trabalho de Bonini et al. (2011),

que avaliou o efeito de estados de compactação na D_s , macro, micro e PT e seu efeito no rendimento de grãos do milho. Os autores concluíram que houve redução no rendimento de grãos (23%) e na taxa de infiltração de água no solo (97%) no tratamento que causou maior compactação do solo. No entanto, não há pesquisas na literatura verificando a influência de estados de compactação no rendimento de grãos e no teor de óleo do crambe.

O crambe vem sendo estudado como matéria-prima para a produção de biocombustível por apresentar elevado teor de óleo (Martins et al., 2012) e pelas suas condições favoráveis ao cultivo, como a sua utilização em rotação de culturas, boa adaptabilidade a solos de baixa fertilidade e sistema radicular agressivo que a torna tolerante à seca e ser tolerante à geada (Pitol, Broch e Roscoe, 2010). O crambe apresenta custo de produção inferior a outras fontes de biocombustível como canola, girassol e soja (Jasper, 2010a).

Neste sentido, objetivou-se avaliar a influência de estados de compactação de um Latossolo argiloso na K_a , $K\theta_s$, porosidade e D_s e suas implicações no rendimento de grãos e teor de óleo da cultura do crambe.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Estabelecimento dos tratamentos

A área experimental foi dividida em quatro faixas, as três primeiras medindo 7 m de largura por 100 m de comprimento e a última compreendendo ao restante da área (79 m de largura por 100 m de comprimento – Figura 1.1). Nas três primeiras faixas, foram gerados três estados de compactação, pelo número de passadas de um rolo compactador Müller RTG2, com massa de cinco toneladas e dispositivo vibratório acionado, com largura da roda compressora de 1,20 m e diâmetro de 1,35 m, largura da roda guia de 1,20 m e 0,96 m de diâmetro.

A umidade gravimétrica no momento das passadas do rolo compactador, obtida pelo método da secagem em estufa (EMBRAPA, 1997), nos respectivos tratamentos e camadas, é apresentada na tabela 1.2.

Os três estados de compactação estabelecidos foram: 1, 3 e 5 passadas e um estado de compactação característico de área manejada sob plantio direto sem passadas do rolo compactador, configurando os tratamentos 0P, sem passada do rolo compactador; 1P, 1 passada do rolo compactador; 3P, 3 passadas; e 5P, 5 passadas (Figura 1.1).

2.2.2 Determinações físicas do solo

Amostras com estrutura alterada de solo foram coletadas antes do plantio do crambe, para a determinação da granulometria e da D_p , em três camadas: 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, com cinco repetições por tratamento. A análise granulométrica (Tabela 1) foi realizada pelo método da pipeta e a D_p foi quantificada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Amostras de solo com estrutura preservada foram usadas para a determinação da D_s , porosidade, $K\theta_s$ e K_a , as quais foram coletadas de forma aleatória com anéis de dimensões 0,04 m de altura por 0,06 m de diâmetro. Essas coletas foram realizadas em outubro (após a colheita do crambe), em três camadas: 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, com cinco repetições aleatórias por tratamento.

As amostras de solo com estrutura preservada foram preparadas e saturadas em água por 48h. Após a saturação, as amostras foram alocadas em coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006), com aplicação de tensão equivalente a 0,6m de coluna de água para extração da água contida nos macroporos.

Após serem retiradas da coluna de areia, as amostras foram equilibradas na tensão de 10kPa em câmara de Richards e posteriormente determinou-se a K_a utilizando-se um permeâmetro de carga constante, conforme metodologia e equipamento adaptados de Vossbrink (2004).

Posteriormente à determinação da K_a , as amostras foram novamente saturadas para determinação da $K\theta_s$, em permeâmetro de carga constante, conforme descrito em EMBRAPA (1997).

Em sequência à determinação da $K\theta_s$, as amostras foram levadas à estufa a 105°C, até obtenção de peso constante para determinação da D_s , micro e macro. A D_s foi determinada pelo método do anel volumétrico, descrito em EMBRAPA (1997).

Para determinação da PT, utilizou-se a equação (1.1).

Com os valores de D_s e conteúdo médio de argila das três camadas avaliadas (62,7%, vide tabela 1), calculou-se o grau de compactação (G_c) utilizando-se a Equação 2.1:

$$G_c = \frac{D_s}{D_{sIHO}} \times 100 \quad (\text{Equação 2.1})$$

em que G_c : grau de compactação (%) e D_{sIHO} : densidade crítica estabelecida a partir do intervalo hídrico ótimo ($D_{sIHO} = 0,00078 \times \% \text{ argila} + 1,83803$; Reichert et al., 2009b).

Foram determinados oito valores de G_c , em que cada valor representa a média do G_c em determinada faixa de densidade resultante dos quatro tratamentos.

2.2.3 Análise gráfica e estatística

Foi considerado um delineamento experimental em Faixas, cujos fatores foram: quatro tratamentos (0P, 1P, 3P e 5P) e três camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m).

A normalidade dos dados foi verificada pelos testes de Shapiro-Wilk (SW), Anderson Darling (AD) ou Kolmogorof Smirnof (KS) e a existência de pontos discrepantes através de gráficos boxplot, ambos com o auxílio do software R (R Core Team, 2014). Foram feitas análise de variância e Teste Tukey a 5% de significância.

Para a camada de 0,1-0,2 m (área de maior concentração das raízes do crambe), realizou-se análise de regressão para verificar a existência de correlação entre $K\theta_s$ e D_s ; $K\theta_s$ e teor de óleo; $K\theta_s$ e rendimento de grãos. Foi verificada a existência de correlação entre G_c e teor de óleo e G_c e rendimento de grãos e avaliada a normalidade dos resíduos e homocedasticidade (Anexo C). Para determinar o melhor modelo de regressão entre as variáveis, foram utilizados os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). Quanto menor for o AIC ou o BIC, melhor é o modelo ajustado.

2.3 Resultados e discussão

A tabela 2.1 apresenta o rendimento de grãos do crambe, teor de óleo e produção total de óleo em função do grau de compactação na segunda camada em estudo (0,1-0,2 m). Com o aumento do grau de compactação ocorreu aumento da Ds, redução da macro e da Kθs (Tabela 2.2). Esses resultados corroboram aos encontrados por Reichert et al. (2009b), cujo trabalho demonstrou que, com aumento no grau de compactação, há uma redução linear na macro e na Kθs. No entanto, neste trabalho não houve redução significativa da Ka, da PT nem da micro, considerando todas as camadas estudadas, à exceção da camada 0,2-0,3 m para a Ka com o aumento do grau de compactação (Tabela 2.2).

Tabela 2.1 – Grau de compactação (Gc) médio em função da faixa de densidade do solo (Ds) na camada de 0,1-0,2 m e Rendimento de grãos, teor de óleo e produção de óleo do crambe

Gc (%)	Faixa de Ds (Mg m ⁻³)	Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹)	Teor de óleo (%)	Produção de óleo (t ha ⁻¹)
54,16	1,00-1,04	2,08	27,00	0,56
55,90	1,04-1,06	1,94	28,21	0,55
56,79	1,06-1,08	2,10	28,24	0,59
58,14	1,08-1,10	1,89	29,37	0,55
59,37	1,10-1,12	1,84	29,16	0,54
60,53	1,12-1,15	1,97	29,44	0,58
61,95	1,15-1,17	1,94	29,83	0,58
63,92	1,17-1,23	1,71	29,25	0,50

As maiores alterações dos atributos físicos estudados ocorreram nas camadas de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m, enquanto que na camada de 0,1-0,2 m a compactação não afetou os atributos físicos em estudo (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (macro), microporosidade (micro), condutividade hidráulica saturada (K θ s) e permeabilidade do solo ao ar (Ka) em quatro estados de compactação e três camadas do solo

Atributo	Tratamento	Camada			Média
		0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m	
Ds (Mg m ⁻³)	0P	0,94 Bb	1,09 Aa	1,07 Ab	1,03
	1P	1,02 Ab	1,09 Aa	1,12 Aab	1,08
	3P	1,11 Aa	1,09 Aa	1,14 Aab	1,11
	5P	1,12 Aa	1,16 Aa	1,17 Aa	1,15
PT (%)	0P	61,01 Aa	58,32 Aa	58,40 Aa	59,24
	1P	60,35 Aa	57,56 Aa	57,74 Aa	58,55
	3P	55,41 Aa	58,84 Aa	58,56 Aa	57,60
	5P	57,06 Aa	56,68 Aa	58,38 Aa	57,37
Macro (%)	0P	17,56 Aa	18,55 Aa	16,16 Aa	17,42
	1P	15,42 Ba	18,34 Aa	14,65 Ba	16,14
	3P	11,79 Cb	18,19 Aa	14,86 Ba	14,95
	5P	14,54 Aab	15,90 Aa	14,30 Aa	14,91
Micro (%)	0P	43,45 Aa	39,77 Ba	42,24 ABa	41,82
	1P	44,93 Aa	39,22 Aa	43,09 Aa	42,41
	3P	43,62 Aa	40,65 Aa	43,70 Aa	42,65
	5P	45,52 Aa	40,78 Ba	44,08 Aa	42,46
K θ s (mm h ⁻¹)	0P	190,10 Aa	20,86 Bb	15,06 Bb	75,34
	1P	54,43 Ab	80,82 Aa	117,42 Aa	84,22
	3P	21,62 Ab	39,30 Ab	7,87 Ab	22,93
	5P	21,32 Ab	05,37 Ab	3,28 Ab	9,99
Ka (μm^2)	0P	34,48 Aa	19,36 Aa	43,58 Aa	32,47
	1P	19,59 Aa	28,92 Aa	12,71 Ab	20,41
	3P	23,54 Aa	38,86 Aa	20,44 Aab	27,61
	5P	17,73 Aa	15,90 Aa	13,61 Ab	15,75

Médias de tratamentos seguidas de mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Os valores médios de K θ s, nas três camadas avaliadas, não foram afetados pelo número de passagens do rolo compactador na comparação do tratamento 0P com os tratamentos 1P e 3P, enquanto o 5P causou o menor valor de K θ s (Tabela 2.2). Na camada de 0,0-0,1 m, ocorreu uma redução de praticamente 90% no valor da K θ s do estado natural de compactação do solo (0P) para 5 passadas do rolo compactador. A redução da K θ s em função do aumento da compactação é atribuída ao aumento da Ds e redução da PT. De acordo com Klein e Libardi (2002), alterações na estrutura de um Latossolo, seja na distribuição do diâmetro dos poros, da redução da PT ou aumento da Ds, causam decréscimo da K θ s.

À medida que aumentou o número de passadas do rolo compactador, tanto a K θ s quanto a Ka foram reduzidas (Figura 2.1). Zhang, Grip e Lövdahl (2006) observaram

resultados semelhantes ao avaliar o efeito da compactação em propriedades hidráulicas em dois Cambissolos na China. Em geral, os maiores valores de $K\theta_s$ são encontrados com os maiores valores de porosidade do solo, porém com a ressalva que poros menores tendem a conduzir mais água e poros maiores em uma dada seção podem não contribuir para o fluxo de água quando apresentam descontinuidade (Mesquita e Moraes, 2004). Neste trabalho, a redução do volume de macroporos contribuiu para o aumento de poros menores provocando redução da $K\theta_s$.

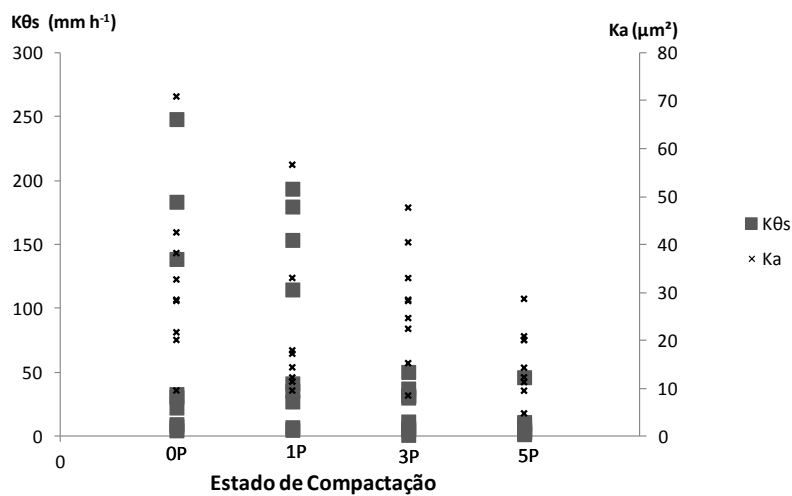


Figura 2.1 – Condutividade hidráulica do solo saturado ($K\theta_s$) e permeabilidade do solo ao ar (Ka) nos tratamentos 0P, 1P, 3P e 5P.

Pelos valores de AIC, BIC, observa-se que a correlação entre D_s e $K\theta_s$, $K\theta_s$ e teor de óleo, $K\theta_s$ e rendimento de grãos, e GC e rendimento de grãos são exponenciais, enquanto a correlação entre GC e teor de óleo é modelada por uma equação logarítmica (Tabela 2.3). Todos os resíduos dos modelos avaliados apresentaram normalidade (Tabela 2.3) e homocedasticidade (Anexo C).

Tabela 2.3 – Avaliação dos modelos de correlação e normalidade dos resíduos

Regressão	Modelo	Índice			<i>p</i> -valor		
		AIC	BIC	R ²	SW	AD	KS
Ds x Kθs	Linear	339,75	344,50	0,771	0,01	0,02	0,02
	Exponencial	90,99	95,75	0,743	0,32	0,31	0,17
Kθs x Teor	Linear	08,79	08,17	0,874	0,36	-	0,31
	Quadrático	05,55	04,72	0,947	0,94	-	0,74
	Exponencial	-31,17	-31,79	0,871	0,45	-	0,42
GC x Teor	Linear	16,75	16,99	0,701	0,30	0,19	0,42
	Quadrático	04,88	05,19	0,947	0,82	0,88	0,91
	Logarítmico	-36,72	-36,48	0,722	0,22	0,14	0,34
Kθs x Rend	Linear	-07,72	-08,34	0,334	0,20	-	0,14
	Quadrático	-06,31	-07,15	0,397	0,41	-	0,50
	Exponencial	-15,85	-16,47	0,332	0,23	-	0,17
GC x Rend	Linear	-11,61	-11,37	0,540	0,02	0,03	0,05
	Quadrático	-09,81	-09,49	0,550	0,06	0,07	0,11
	Exponencial	-21,95	-21,71	0,540	0,02	0,04	0,08

AIC: critério de informação de Akaike; BIC: critério de informação bayesiano; SW:

A Kθs foi inversamente proporcional à Ds (Figura 2.2). De acordo com Reichert et al. (2009b), há indícios de restrições ao crescimento radicular e consequente redução da produtividade das culturas quando a Ds, em solos argilosos, for superior a 1,25 Mg m⁻³. Se levarmos em consideração esse valor de Ds como referência, o valor de Kθs correspondente 2,55 mm h⁻¹ indicaria redução da produtividade. No presente estudo, o maior valor de Ds foi 1,23 Mg m⁻³, no tratamento 5P, portanto não há indícios de restrição do crescimento radicular.

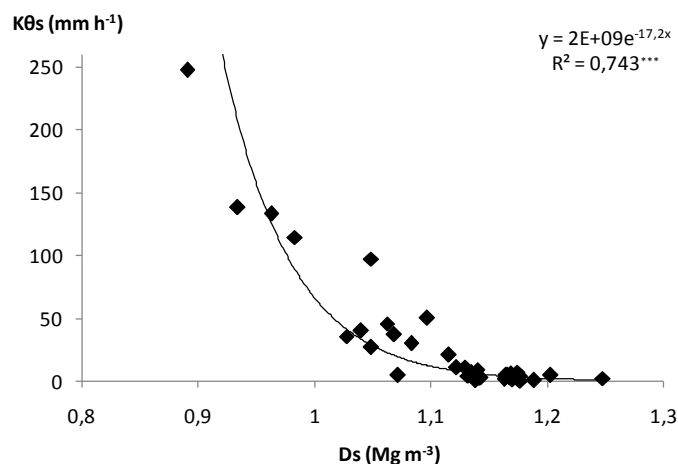


Figura 2.2 – Comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado (Kθs) em função da densidade do solo (Ds) na profundidade de 0,1-0,2 m. ***Significativo a 0,001.

A figura 2.3 apresenta as regressões entre a $K\theta_s$ e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe e entre o grau de compactação e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe na camada de 0,1-0,2 m. Nesta camada, a D_s varia de 0,89-1,23 $Mg\ m^{-3}$. Nesta faixa de densidade, observa-se que o teor de óleo do crambe é diretamente proporcional ao grau de compactação (Figura 2.3(b)) e inversamente proporcional ao $K\theta_s$ (Figura 2.3(a)). Já o rendimento de grãos do crambe é inversamente proporcional ao grau de compactação nesta camada (Figura 2.3(d)). Isto pode ser explicado pela relação fonte:dreno, abordada no Capítulo 1. O rendimento de grãos do crambe não apresenta relação significativa com a $K\theta_s$ (Figura 2.3(c)).

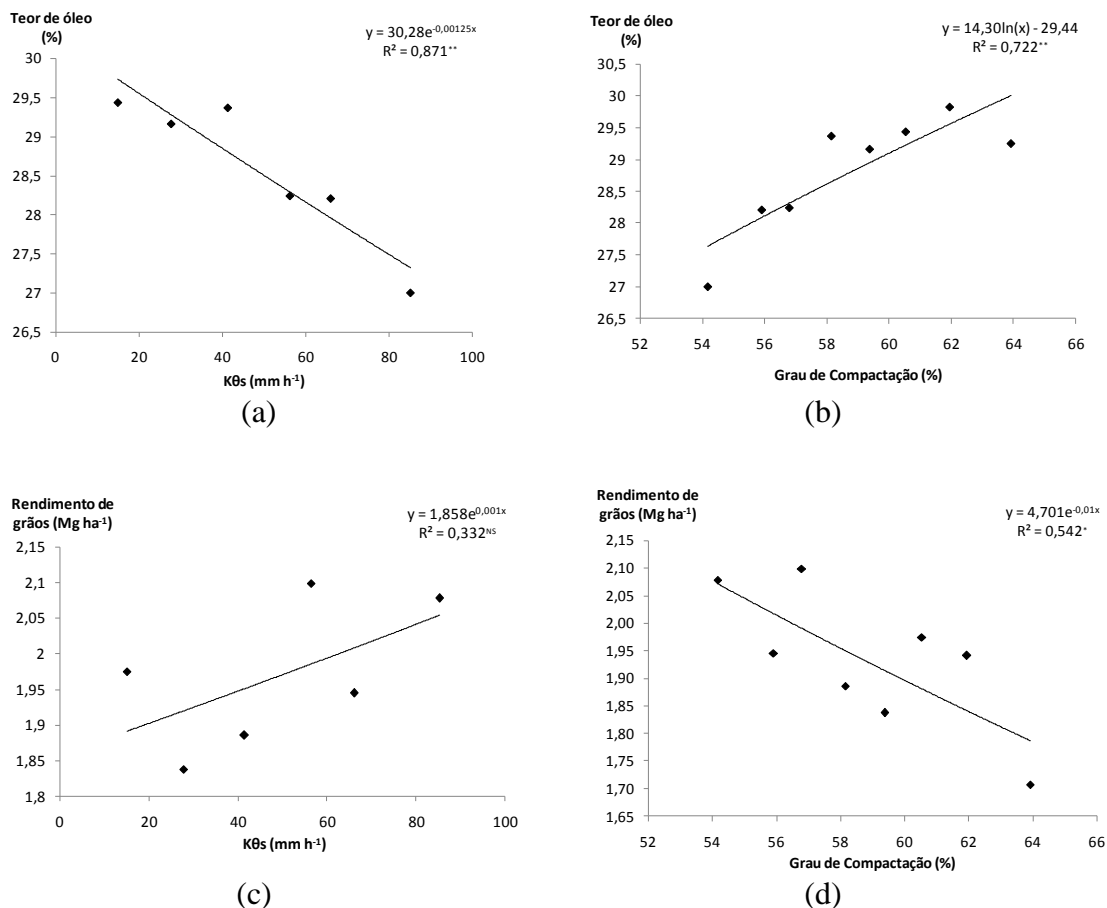


Figura 2.3 – Teor de óleo do crambe em função da condutividade hidráulica do solo saturado ($K\theta_s$) (a) e do grau de compactação do solo (b) e rendimento de grãos do crambe em função da condutividade hidráulica do solo saturado (c) e do grau de compactação (d) na camada de 0,1-0,2 m. **Significativo a 0,01; *Significativo a 0,05; NS: Não significativo.

Embora existam evidências de que o rendimento de grãos das culturas agrícolas é afetado negativamente com a compactação (Secco et al., 2009), o mesmo não se pode afirmar quanto ao teor de óleo. Lunelli et al. (2013) afirmam que o rendimento de grãos da cultura do crambe não é correlacionado diretamente com o rendimento de óleo da mesma. Dessa forma, pode-se afirmar que, quando a Ds variou de 0,89 a 1,23 Mg m⁻³, embora a compactação não tenha favorecido o rendimento de grãos, houve aumento no teor de óleo do crambe, já que o teor de óleo do crambe pode estar mais associado à qualidade do grão, não necessariamente à sua massa. Acredita-se que, devido à redução de água disponível causada pela compactação, a planta tenha acelerado seu ciclo de desenvolvimento para garantir a sobrevivência da espécie.

A qualidade do óleo é geralmente definida pelas concentrações de ácidos linolêico e olêico (Connor e Sadras, 1992). Conforme os autores, diferentes épocas de semeadura e regimes hídricos podem causar diferentes condições ambientais enquanto ocorre o enchimento dos grãos e síntese do óleo, afetando as proporções de tais ácidos. Assim, acredita-se que a falta de água possa ter afetado o teor de óleo do crambe, já que de acordo com Champolivier e Merrien (1996), inúmeras pesquisas demonstraram que o estresse hídrico casado pela compactação, durante o período de enchimento dos grãos, aumenta a concentração de óleo nas sementes.

2.4 Conclusões

- Alta densidade e baixa K_θs gera redução do rendimento de grãos do crambe, porém aumento no teor de óleo.
- Diferentes graus de compactação repercutem em diferenças significativas nos atributos físico-hídricos: K_a, K_θs e D_s.
- A pressão imposta pelo rolo compactador não foi suficiente para elevar a D_s a uma faixa que restringisse o crescimento radicular.

CAPÍTULO 3

AMOSTRAGEM PARA VALIDAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO E SEUS REFLEXOS NO RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE

Resumo

A crescente motivação dos órgãos governamentais pela produção e uso de biocombustíveis tem levado pesquisadores em todo mundo à busca por fontes renováveis de combustíveis cuja produção não entre em conflito com o setor alimentício e que apresentem desempenho semelhante àquele apresentado pelos combustíveis fósseis, preferencialmente com custo de produção inferior. Neste cenário surge o crambe, uma cultura de inverno facilmente adaptável à rotação de culturas, cujas sementes apresentam elevado teor de óleo e vem sendo utilizado para produção de biocombustível. No entanto, pouco se tem pesquisado sobre a influência da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo no rendimento de grãos e no teor de óleo do crambe. O objetivo principal deste trabalho foi averiguar os reflexos da distribuição espacial de atributos químicos de um Latossolo no rendimento de grãos e teor de óleo do crambe, utilizando técnicas de geoestatística. Verificou-se também a qualidade da densidade amostral para a identificação da melhor distribuição espacial visando aplicação da Agricultura de Precisão. Os atributos químicos que apresentaram maior relação espacial direta com o rendimento de grãos do crambe foram o P em 2012 e Mg, Ca e N (MO) em 2013. Concluiu-se também que malhas amostrais construídas com pontos espaçados a grandes distâncias não são eficazes na detecção da variabilidade espacial de atributos químicos e do rendimento de grãos e teor de óleo do crambe.

Palavras-chave: Biocombustíveis; Agricultura de Precisão; Química do Solo.

3.1 Introdução

Há uma crescente motivação às pesquisas voltadas a busca por fontes renováveis de combustível, principalmente após o Tratado Internacional sobre Aquecimento Global, que requer a substituição do combustível fóssil por alguma forma de energia alternativa (Falasca et al., 2010). Essa motivação se deve aos impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, a crescente preocupação mundial com os estoques de petróleo (Li et al., 2011; Wazilewski et al., 2013), o fato do uso de petróleo contribuir para a entrada de dióxido de carbono na atmosfera, dando origem a um aumento da temperatura média da terra e dos oceanos (Carlsson, 2009), aliados à escassez de petróleo em alguns países.

Dentre os motivos para a produção e utilização de biodiesel, destaca-se o fato dele contribuir para melhorar as condições ambientais a partir da redução da emissão de gases poluentes (Jasper et al., 2010a). Além disso, os combustíveis derivados de fontes biológicas como plantas e animais, atuam como combustível substituto ao diesel de petróleo, com desempenho muito próximo ao deste, não exigindo modificações nos motores (Dabdoub e Bronzel, 2009).

No Brasil, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (2005), foi estabelecido a partir de 2013, a inserção obrigatória de 5% de biocombustível em todo óleo combustível vendido em território nacional. Segundo Jasper et al. (2010a), houve uma resposta do setor agroindustrial à este programa, porém, há várias dificuldades para a produção do biodiesel, como: pequena oferta de matéria-prima, escassez do óleo vegetal e alta dos preços das matérias-primas disponíveis para a produção.

Para atender às necessidades mundiais, é necessária a utilização de fontes renováveis para produção de biocombustíveis, que não concorram diretamente com a produção de alimentos. Acredita-se que o crambe tenha grande potencial para constituir-se como matéria-prima para produção de biodiesel, por se tratar de uma cultura de inverno facilmente adaptável à rotação de cultura, apresentar um sistema radicular agressivo, adaptabilidade a solos de baixa fertilidade, baixo custo de produção, ser tolerante à seca e geada, além de apresentar elevado teor de óleo (Jasper et al., 2010b).

O crambe é originário do mediterrâneo e vem sendo pesquisado há algum tempo no Brasil e outras regiões do mundo, por conter cerca de 55 a 60% de ácido erúico em sua composição e por não haver cruzamento de interesse entre o setor alimentício e o de produção

de óleo (Li et al., 2011), já que suas sementes contém elevada porcentagem de glucosinolatos, que podem afetar a qualidade nutricional de animais (Lalas et al., 2012) e dos humanos.

Outra vantagem da utilização de crambe é que o óleo extraído de suas sementes pode ser utilizado como lubrificante industrial, inibidor da corrosão, como ingrediente na produção de borracha sintética, de películas de plástico, nylon, plastificantes, adesivos e isolamento elétrico. A partir do óleo, também obtém-se uma substância utilizada na preparação de cosméticos, chamada erucamida (Falasca et al., 2010).

Além dos esforços na busca por combustíveis renováveis, na tentativa de promover aumento no rendimento das culturas e visando redução de impactos ambientais pelo uso excessivo de defensivos agrícolas, produtores têm recorrido à AP, para identificação de zonas específicas a fim de realizar um tratamento setorizado, principalmente com respeito a atributos químicos e fertilidade do solo. A AP possibilita a aplicação exata dos insumos, baseado no mapeamento do solo, reduzindo os custos com suprimentos agrícolas e aumentando a produtividade (Dalchiavon et al., 2013).

Segundo Yao et al. (2014), com o avanço na AP, a necessidade de compreender a relação espacial entre o rendimento de grãos, as propriedades do solo e as práticas de manejo está se tornando cada vez mais importante devido à preocupações em obter alto rendimento das culturas e eficiência na práticas agrícolas.

No entanto, deve-se observar a qualidade do mapeamento para obtenção de resultados confiáveis. Segundo Nanni et al., (2011) prestadores de serviços na área de AP estão realizando muitas vezes uma amostragem que pode não representar as características reais do campo e utilizando densidades amostrais com uma amostra a cada cinco hectares comumente, sem qualquer justificativa, em busca de economia e praticidade.

De acordo com Pereira et al. (2013), os altos custos de um esquema amostral ótimo para cada atributo químico do solo dificultam a implantação da AP, porém, uma intensidade amostral ineficiente pode ser um fator limitante para a qualidade dos resultados obtidos.

Caon e Genú (2013) comentam que sendo a amostragem o processo inicial de mapeamento, realizá-la de forma ineficiente pode levar a um planejamento errôneo quanto à aplicação de corretivos e fertilizantes, os autores afirmam ainda que quanto maior o nível de detalhamento amostral dos atributos químicos do solo, maior será a precisão dos mapas gerados.

A avaliação espacial de atributos químicos associada a culturas energéticas tem sido feita por diversos autores no Brasil, como Reichert et al. (2008) que estudaram a variabilidade espacial de alguns atributos químicos e sua relação com a produtividade da soja em um

Planossolo, com o intuito de contribuir para o planejamento de lavouras comerciais. Lima, Silva e Silva (2013), avaliaram vertical e horizontalmente a distribuição espacial de nutrientes e atributos químicos em um Latossolo e sua influência na soja e Vieira et al. (2012b), avaliaram a variabilidade espacial da cultura do crambe e atributos químicos do solo em um Latossolo argiloso. De maneira geral, todos os trabalhos verificaram existência de dependência espacial entre as amostras dos atributos químicos do solo.

Embora diferentes pesquisas tenham avaliado as vantagens da utilização do crambe, poucos têm verificado a influência das propriedades químicas e da fertilidade do solo no rendimento de grãos e no teor de óleo desta cultura.

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos seguintes atributos/características químico(a)s do solo: Alumínio (Al), Boro (B), Cálcio (Ca), CTC, Cobre (Cu), Potássio (K), Magnésio (Mg), Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), pH, Enxofre (S), Saturação por Al, Saturação por Bases (V) e Zinco (Zn), relacionando com o rendimento de grãos e de óleo do crambe e averiguar a amostragem para validação do mapeamento destas variáveis.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Malha experimental

Na instalação da malha experimental foi utilizado um GPS da marca Garmim, modelo 60CSx. Foi construída uma malha experimental base, composta por 133 pontos, conforme a figura 3.1(a). Desta malha, foram retirados pontos de forma a obter outras cinco malhas experimentais, para avaliar o número de pontos necessários para uma adequada avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo.

- Malha(a) base, composta por 81 (9 x 9) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 11 m e uma sub-malha composta por 64 (8 x 8) pontos separados entre si por uma distância mínima de 5,5 m, dos quais alguns fazem parte da malha maior, totalizando 133 pontos (Figura 3.1a);
- Malha(b) composta por 81 (9 x 9) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 11 m (Figura 3.1b);

- Malha(c) composta por 25 (5 x 5) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 22 m e uma sub-malha composta por 25 (5 x 5) pontos separados entre si por uma distância mínima de 11 m, dos quais alguns fazem parte da malha maior, totalizando 41 pontos (Figura 3.1c);
- Malha(d) composta por 25 (5 x 5) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 22 m (Figura 3.1d);
- Malha(e) composta por 9 (3 x 3) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 44 m e uma sub-malha composta por 9 (3 x 3) pontos separados entre si por uma distância mínima de 22 m, dos quais alguns fazem parte da malha maior, totalizando 15 pontos (Figura 3.1e);
- Malha(f) composta por 9 (3 x 3) pontos espaçados entre si por uma distância mínima de 44 m (Figura 3.1f).

A figura 3.1 apresenta os esquemas amostrais utilizados.

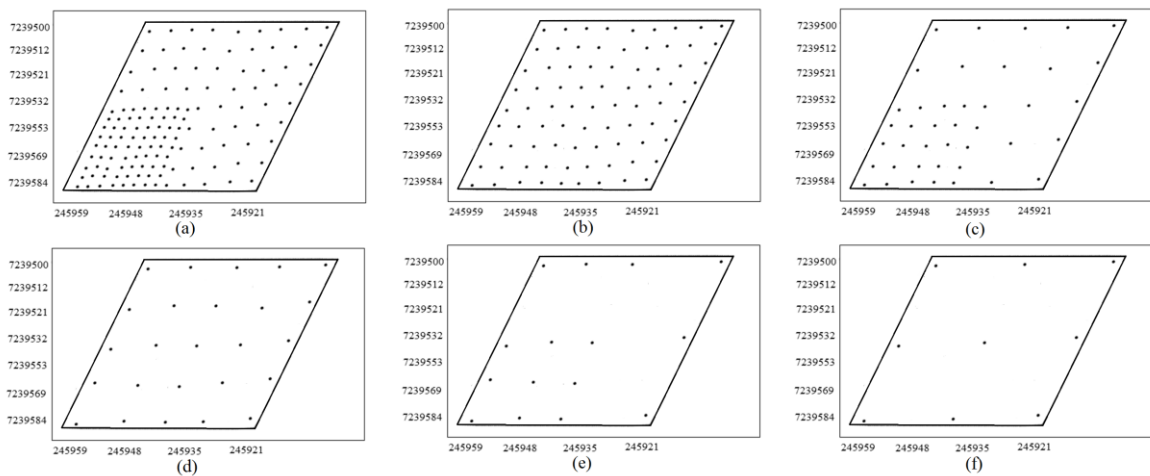


Figura 3.1 – Malhas amostrais apresentando a distribuição dos pontos georreferenciados compostas por 133 pontos (a), 81 pontos (b), 41 pontos (c), 25 pontos (d), 15 pontos (e) e 9 pontos amostrais (f).

3.2.2 Coleta de amostras e determinações químicas do solo

Foram realizadas duas coletas de amostras parcialmente deformadas do solo (aproximadamente 0,5 kg), na camada de 0,0-0,1 m, para avaliação dos atributos químicos,

nos anos de 2012 e 2013, antes do plantio do crambe, em cada ponto amostral da figura 3.1a. As amostras foram secadas ao ar, peneiradas em peneira de malha 2 mm e submetidas à análise de rotina para caracterização química das mesmas no Laboratório de Rotina do Departamento de Solos da UFSM.

Foram determinados os seguintes atributos/propriedades químico(a)s: P (mg/l), K (mg/l), MO (%), Al (cmolc/l), Ca (cmolc/l), Mg (cmolc/l), CTC efetiva, CTC pH7, Saturação por Bases (%), Saturação por Al (%), Zn (mg/l), Cu (mg/l), S (mg/l) e B (mg/l).

Al e Ca foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, P, K, Zn e Cu por Mehlich, o pH foi determinado por leitura direta com potenciômetro em suspensão solo:água 1:1, a MO foi determinada por digestão úmida com mistura sulfocrômica, o B foi extraído por água quente, a CTC, saturação por Al e por bases foram calculadas de acordo com os métodos descritos por Tedesco et al. (1995).

3.2.3 Análise estatística

Foi realizada uma análise exploratória completa dos dados utilizando o Software R (R Core Team, 2014), avaliando medidas de tendência central, de dispersão, de forma e de simetria (Anexo D).

Em seguida, uma análise exploratória espacial, com auxílio dos pacotes geoR (Diggle e Ribeiro Jr., 2007), splancs (Rowlingson e Diggle, 2014), MASS (Venables e Ripley, 2002) e classInt (Bivand, 2013) do software R (R Core Team, 2014), avaliando a existência e estrutura da dependência espacial entre as amostras dos atributos químicos e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe, e gerados mapas de superfície para todas as malhas amostrais apresentados na figura 3.1.

A fim de comparar os mapas e assim avaliar o número necessário de pontos para uma coleta de dados representativa da área, foram utilizados o índice de Exatidão Global (EG) e o índice Kappa (Krippendorff (1980), Congalton e Green, 1999), considerando como modelos, os mapas gerados com a malha amostral da figura 3.1(a). O índice de EG estima a exatidão entre os mapas e o índice Kappa estima uma medida de concordância (similaridade) entre os valores do mapa de referência e os valores do mapa modelo, e são obtidos respectivamente pelas equações 3.1 e 3.2:

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (\text{Equação 3.1})$$

em que EG = índice de Exatidão Global, x_{ii} é a quantidade de área similar entre os dois mapas e N é o número total de pixels.

Quanto maior o valor de EG, maior a exatidão entre os mapas.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} + x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} + x_{+i}} \quad (\text{Equação 3.2})$$

em que k = índice Kappa, x_{i+} é a quantidade de área similar entre os dois mapas da linha i (que se refere à uma classe de pixels no mapa) e x_{+i} é a quantidade de área similar entre os dois mapas da coluna i .

De acordo com Krippendorff (1980) há baixa concordância entre os mapas se $k < 0,67$, média concordância se $0,67 \leq k < 0,80$ e alta concordância se $k \geq 0,80$.

3.3 Resultados e discussão

O rendimento médio de grãos do crambe em 2012 foi de 1,94 Mg ha⁻¹ (Tabela 3.1). Estes resultados são corroborados por Martins et al. (2012), porém, o teor de óleo das sementes (29,32%) está abaixo do esperado, nos dois anos do experimento, pois segundo o autor, a produção média do crambe é em torno de 1,5 a 1,9 t ha⁻¹ e o teor de óleo das sementes é acima de 38%. Os atributos químicos que apresentaram heterogeneidade (CV > 30%) nos dois anos foram: Al, Cu, K, P e Zn, já o B apresentou heterogeneidade no Ano de 2012 e o Ca, Mg e S no ano de 2013 (Tabela 3.1).

Quanto à dependência espacial, em 2012, apenas o K não apresentou estrutura de dependência espacial, já em 2013, além do K, o Cu, P e Zn também não apresentaram estrutura de dependência espacial. Os demais atributos químicos apresentaram dependência espacial de fraca a forte, sendo a maioria modelada pelos semivariogramas esférico ou exponencial (Tabela 3.1). A variabilidade espacial dos elementos químicos está associada à sua mobilidade no solo (no caso do K, alta mobilidade), à forma de distribuição destes no momento da fertilização do solo (se a lanço ou em linha) ou ainda à declividade do terreno ao direcionar o escoamento da enxurrada. Apenas os atributos Al e Saturação por Al apresentaram dependência espacial forte, resultados semelhantes foram apresentados por Souza et al. (2008).

Os menores alcances (a) foram obtidos para Cu e Saturação por bases (2012) e CTC a pH7 (2013), evidenciando necessidade de aumento da densidade amostral, com pontos menos espaçados para gerar mapas mais precisos destes atributos (Tabela 3.1).

Nos dois anos do experimento, a MO apresentou dependência espacial moderada (Tabela 3.1). Resultados semelhantes foram obtidos por Vieira et al. (2012b) e por Lima, Silva e Silva (2013). Segundo estes autores, isto ocorre devido ao não revolvimento do solo para a semeadura e à lenta decomposição dos resíduos orgânicos, indicando que a MO apresentam maior continuidade espacial.

Tabela 3.1 – Resultado das análises descritivas e estrutura de dependência espacial dos atributos químicos avaliados nos dois anos de estudo

Ano	Variável	Média	CV	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	GD	FD
2012	Rend. (Mg ha ⁻¹)	1,94	24,72	Exponencial	0,09	0,36	70	75,0	Moderada
	Teor de óleo (%)	29,32	13,75	Esférico	15,25	17,0	70	10,3	Fraca
	Al(cmol _c /l)	0,22	123,21	Esférico	0,07	0,08	50	12,5	Fraca
	B(mg/l)	0,37	44,79	Epp	0,03	-	-	-	-
	Ca(cmol _c /l)	6,98	22,93	Exponencial	2,01	3,01	70	33,2	Moderada
	CTC efet(cmol _c /kg)	10,12	20,75	Esférico	3,85	5,00	70	23,0	Fraca
	CTC pH7(cmol _c /kg)	16,94	8,71	Exponencial	1,61	2,50	70	35,6	Moderada
	Cu (mg/l)	3,68	45,27	Exponencial	1,61	2,80	15	42,5	Moderada
	K (mg/l)	158	47,74	-	-	-	-	-	-
	Mg (cmol _c /l)	2,49	28,74	Epp	0,51	-	-	-	-
	MO(%)	4,65	13,65	Esférico	0,17	0,51	67	66,7	Moderada
	P(mg/l)	17,29	97,12	Esférico	212	242	65	12,4	Fraca
	pH	5,25	5,42	Esférico	0,07	0,08	50	12,5	Fraca
	S (mg/l)	25,5	18,89	Exponencial	11,49	28,46	24	59,6	Moderada
	Sat_Al (%)	2,82	151,90	Exponencial	16,83	20,00	70	15,9	Fraca
	V (%)	58,02	18,29	Esférico	100,9	116,23	17	13,2	Fraca
Zn (mg/l)	6,17	82,82	Exponencial	15,08	23,59	85	36,1	Moderada	
2013	Rend. (Mg ha ⁻¹)	1,01	4,91	Exponencial	0,001	0,004	55	75,0	Moderada
	Al (cmol _c /l)	0,09	216,79	Esférico	0,01	0,05	60	80,0	Forte
	B (mg/l)	0,43	29,19	Esférico	0,01	0,016	50	37,5	Moderada
	Ca (cmol _c /l)	6,88	32,41	Exponencial	3,05	5,65	23	46,0	Moderada
	CTC efet(cmol _c /kg)	10,36	30,47	Esférico	6,5	10,8	46	39,8	Moderada
	CTC pH7(cmol _c /kg)	15,47	18,39	Exponencial	4,89	5,4	10	9,4	Fraca
	Cu (mg/l)	2,36	31,07	-	-	-	-	-	-
	K (mg/l)	163,6	77,71	-	-	-	-	-	-
	Mg (cmol _c /l)	2,98	33,51	Esférico	0,61	1,08	44	43,5	Moderada
	MO (%)	4,97	12,11	Gaussiano	0,21	0,38	19	44,7	Moderada
	P (mg/l)	22,02	173,16	-	-	-	-	-	-
	pH	5,94	5,15	Exponencial	0,06	0,1	60	40,0	Moderada
	S (mg/l)	7,06	47,63	Esférico	5,04	12,58	41	59,9	Moderada
	Sat_Al (%)	1,63	277,42	Exponencial	6,4	27,72	25	76,9	Forte
	V (%)	64,77	19,46	Esférico	107	174,31	44	38,6	Moderada
	Zn (mg/l)	5,19	110,65	-	-	-	-	-	-

Epp: Efeito pepita puro; CV: coeficiente de variação; C_0 : efeito pepita; C_0+C_1 : patamar; a : alcance; GD: grau de dependência; FD: faixa de dependência; Sat_Al: saturação por Al; V: saturação por bases; .

A área amostral está localizada sobre um divisor de águas, sendo que a declividade é maior nas laterais da área, fazendo com que haja maior concentração dos nutrientes nas laterais da área experimental, no sentido da maior para menor declividade (figura 3.3 (b), (d) e (f)), em conformidade com o mapa de declividade da área amostral (figura 3.2).

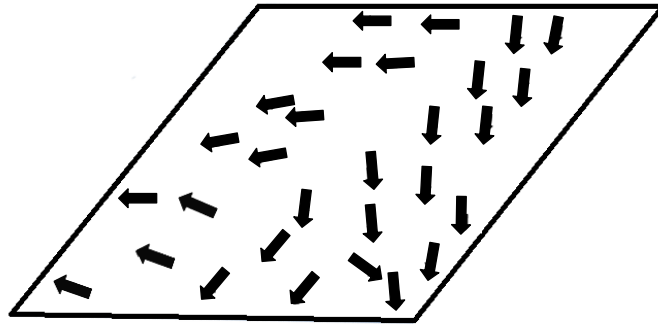


Figura 3.2 – Declividade da área amostral.

Nos locais onde houve maior rendimento de grãos (canto esquerdo inferior da figura 1.7(b)) em 2012, ocorreu maior concentração de P (figura 3.3 (g)), já em 2013, o rendimento de grãos (figura 1.7(c)) é maior onde há maior concentração de Ca, Mg e N (MO – figura 3.3 (b, d, f)). Lunelli et al. (2013) não observaram efeito significativo dos nutrientes NPK no rendimento de grãos do crambe, porém, no teor de óleo, os autores observaram que o tratamento utilizando NPK apresentou maior rendimento de óleo que os demais.

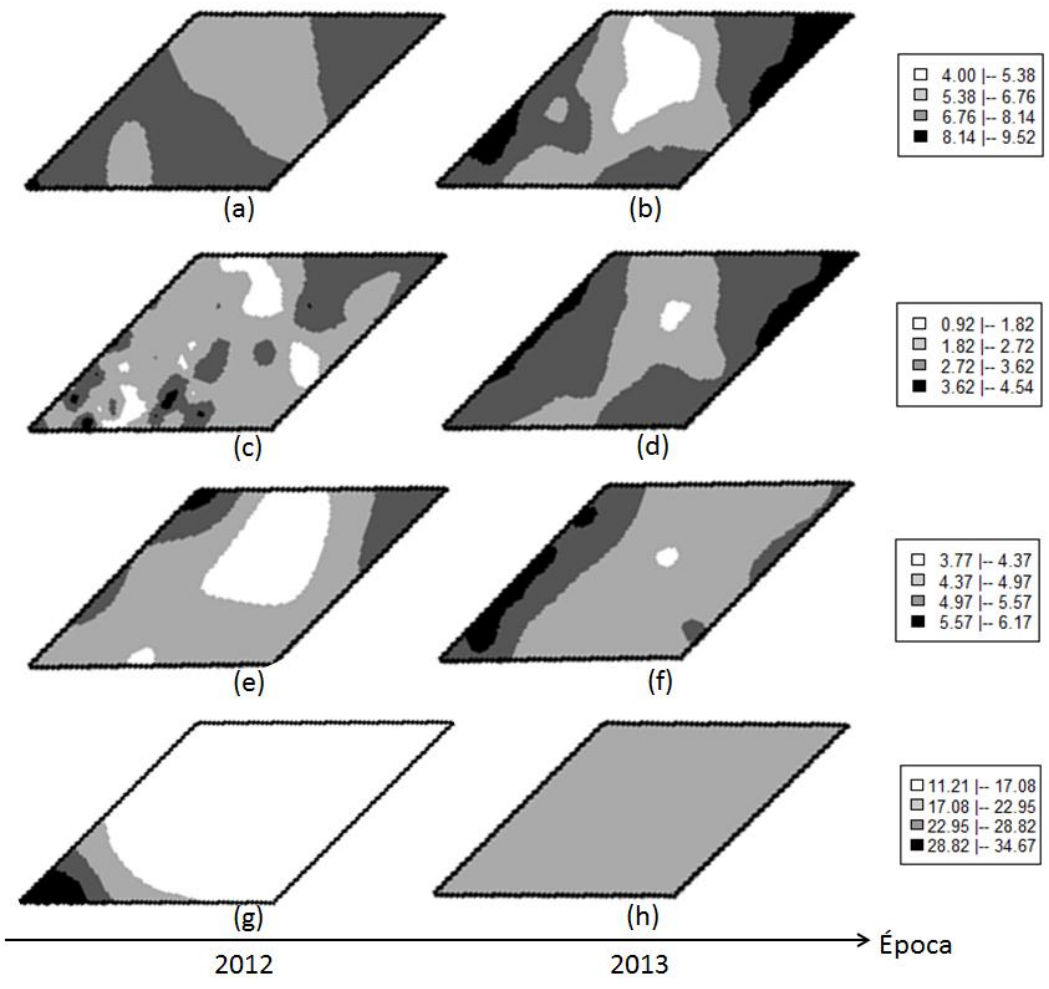


Figura 3.3 – Mapas de superfície dos macronutrientes: Ca (a, b); Mg (c, d); N (MO: e, f) e P (g, h), respectivamente em 2012 e 2013.

A figura 3.4 apresenta os mapas de superfície dos micronutrientes B, Cu, S e Zn, nos em 2012 e 2013.

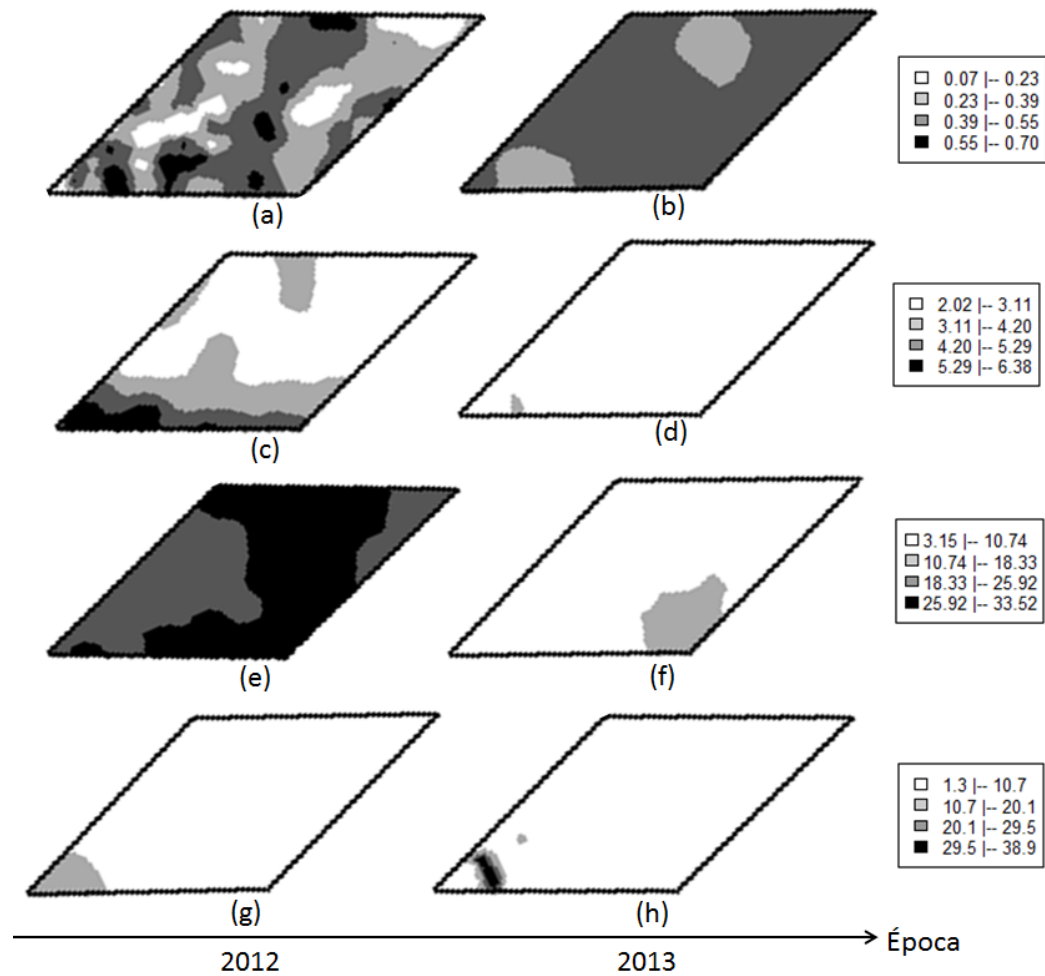


Figura 3.4 – Mapas de superfície dos micronutrientes: B (a, b); Cu (c, d); S (e, f) e Zn (g, h), respectivamente em 2012 e 2013.

Como não há na literatura manual de adubação e calagem exclusivo para a cultura do crambe, pouco se pode inferir sobre a resposta da cultura com respeito ao alumínio e a saturação por bases. No entanto, observa-se que nos locais de maior concentração de alumínio (figura 3.5 (b, d)), houve menor rendimento de grãos do crambe em 2013.

De acordo com Fageria (1998), se o pH não estiver na faixa adequada de disponibilidade de nutrientes (5,5-6,5), a deficiência e/ou toxidez nutricional poderá ocorrer, a produção das culturas poderá ser prejudicada e a eficiência nutricional diminuir, já que a disponibilidade de fósforo é altamente dependente do pH e o principal fator que controla a concentração do Al na solução do solo é o pH. Observa-se na Figura 3.5 (g), que o pH estava abaixo da faixa adequada de disponibilidade de nutrientes em 2012.

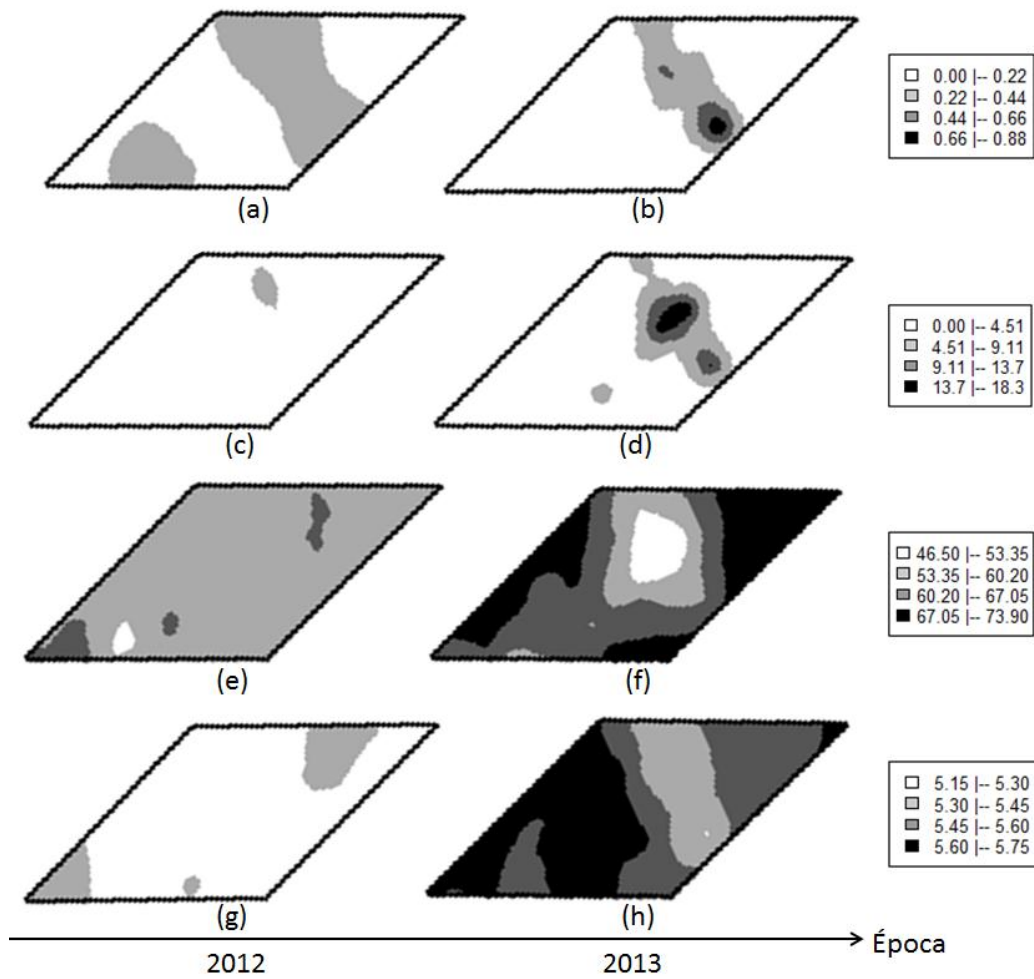


Figura 3.5 – Mapas de superfície dos atributos Al (a, b); Saturação por Al (c, d); Saturação por Bases (e, f) e pH (g, h), respectivamente em 2012 e 2013.

A figura 3.6 apresenta os mapas de superfície do rendimento de grãos do crambe no ano de 2012, gerados pela estrutura de dependência espacial modelada a partir das seis malhas amostrais apresentadas na figura 3.1. Observa-se que os mapas gerados pelas malhas (a) e (b) apresentam alta similaridade visual, o mapa gerado pela malha (c) parece similar aos gerados pelas malhas (a) e (b), já os demais mapas [(d), (e) e (f)] apresentam pouca similaridade.

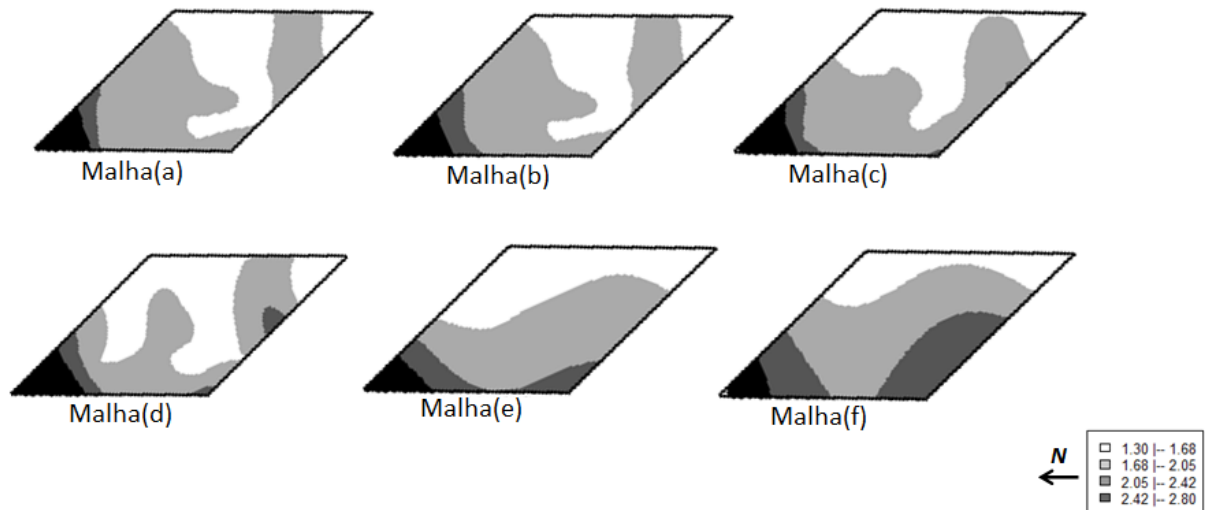


Figura 3.6 – Mapas de superfície do rendimento de grãos do crambe (Mg ha^{-1}) em 2012, utilizando as seis malhas experimentais e a escala obtida pela simulação dos dados na Malha(a).

Observa-se que os mapas gerados por estas duas malhas apresentam alta exatidão ($\text{EG} = 96\%$) e alta concordância, já que $\text{Kappa} = 0,91$ (Tabela 3.2 e Equações 3.3 e 3.4).

Tabela 3.2 – Matriz de erro de classificação entre os mapas gerados pelas malhas amostrais (a) e (b) para o Rendimento de grãos do crambe em 2012

Classes		Mapa com a Malha(a)							
		1,30 1,68	1,68 2,05	2,05 2,42	2,42 2,80	Total			
Mapa com a Malha(b)	1,30 1,68	5872	97	0	0	5969			
	1,68 2,05	101	14552	0	0	14653			
	2,05 2,42	0	728	673	0	1401			
	2,42 2,80	0	0	79	1075	1154			
Total		5973	15377	752	1075	23177			

$$\text{EG} = \frac{5872+14552+673+1075}{23177} = 0,96 \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$k = \frac{23177 \cdot (5872+14552+673+1075) - (5973 \cdot 5969 + 15377 \cdot 14653 + 752 \cdot 1401 + 1075 \cdot 1154)}{23177^2 - (5973 \cdot 5969 + 15377 \cdot 14653 + 752 \cdot 1401 + 1075 \cdot 1154)} = 0,91 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Tendo em vista a alta exatidão e concordância entre os mapas gerados pelas malhas (a) e (b), a malha(b) foi utilizado como base para avaliar a exatidão e concordância dos mapas gerados com as demais malhas. A tabela 3.3 apresenta os índices de similaridade entre os

mapas gerados pela malha(b) e as demais malhas para o rendimento de grãos e os macronutrientes em estudo, nos dois anos. Exceto para o rendimento de grãos, todos os mapas apresentaram baixa exatidão com o mapa gerado pela malha(b).

Observa-se também na tabela 3.3, que os mapas gerados pela malha(f) foram os que apresentaram menor exatidão quando comparados à malha(b). Isto ocorre provavelmente pelo fato de terem sido considerados apenas nove pontos nesta malha, pela escolha do número de lags (pontos do semivariograma) e número mínimo de pares utilizados para o cálculo da semivariância, já que, no ato da geração dos mapas, foi necessário reduzir o número de lags para apenas quatro e o número mínimo de pares para cinco.

Conforme comentado anteriormente, atualmente muitos prestadores de serviços na área de AP utilizam apenas um ponto a cada cinco hectares (Nanni et al., 2011), sem qualquer justificativa. Esta escolha pode acarretar na geração de mapas que não apresentam a verdadeira variabilidade espacial dos atributos químicos da área em estudo.

Tabela 3.3 – Índices de similaridade (Exatidão Global – EG e Kappa – K) entre o mapa gerado pela malha(b) e as demais malhas amostrais [(c), (d), (e) e (f)] para o rendimento de grãos do crambe, macronutrientes e pH nos Anos de 2012 e 2013

	Variável	Malha(c)		Malha(d)		Malha(e)		Malha(f)	
		EG	K	EG	K	EG	K	EG	K
2012	Rendimento	0,79	0,49	0,81	0,52	0,62	0,34	0,52	0,17
	Al	0,46	0,26	0,54	0,27	0,31	0,14	0,42	0,14
	Ca	0,64	0,39	0,63	0,59	0,58	0,20	0,23	0,00
	Mg	0,73	0,54	0,40	0,09	0,59	0,18	0,30	0,09
	MO	0,69	0,43	0,64	0,33	0,74	0,26	0,62	0,12
	P	0,78	0,44	0,90	0,53	0,80	0,60	0,52	0,17
	pH	0,41	0,13	0,42	0,14	0,40	0,10	0,35	0,10
2013	Rendimento	0,84	0,69	0,77	0,54	0,54	0,27	0,50	0,18
	Al	0,67	0,49	0,48	0,31	0,40	0,15	0,52	0,07
	Ca	0,57	0,24	0,48	0,17	0,44	0,11	0,52	0,10
	Mg	0,69	0,52	0,56	0,35	0,50	0,25	0,46	0,05
	MO	0,51	0,34	0,56	0,26	0,46	0,16	0,45	0,12
	P	0,78	0,49	0,81	0,52	0,62	0,34	0,52	0,17
	pH	0,34	0,07	0,21	0,02	0,42	0,17	0,41	0,17

Considerando que os mapas gerados a partir da Malha(d) apresentam para a maioria das variáveis estudadas concordância e exatidão acima de 50% e um número relativamente

pequeno de amostras a serem coletadas por hectare (25), sugere-se a utilização desta malha para avaliação destas variáveis.

3.4 Conclusões

- Os atributos químicos que apresentaram maior relação espacial direta com o rendimento de grãos do crambe foram o P em 2012 e Ca, Mg e MO em 2013;
- Malhas amostrais construídos com pontos espaçados a grandes distâncias não são eficazes na detecção da variabilidade espacial de atributos químicos e do rendimento de grãos e teor de óleo do crambe.

CAPÍTULO 4

MODELO DE CORRELAÇÃO ESPACIAL BASEADO EM JANELAS MÓVEIS APLICADO A ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO E RENDIMENTO DE GRÃOS E DE ÓLEO DO CRAMBE

Resumo

O conhecimento da correlação espacial entre atributos do solo e entre estes e o rendimento de grãos de culturas agrícolas é de fundamental importância quando se deseja inferir sobre um atributo mais difícil de ser mensurado utilizando informações de outro que com ele esteja correlacionado espacialmente e/ou tomar decisões a cerca do uso e manejo adequado do solo buscando aumento no rendimento de grãos. Ao longo da história, pesquisadores têm construído estimadores da correlação espacial na busca por uma equação que represente adequadamente a estrutura de correlação, sobretudo para dados que não apresentem distribuição normal ou que tenham alta dispersão, destacando-se o estimador da correlação cruzada conhecido como Semivariograma Cruzado (SC). O objetivo deste trabalho foi construir um estimador da correlação espacial baseado em janelas móveis (SCJM). Foram gerados conjuntos de duas variáveis cujos dados apresentavam estrutura de correlação espacial escolhida, por meio de simulação, utilizando os pacotes *gstat* e *RandomFields* do software R. Estes dados foram aplicados ao SC e ao SCJM e os resultados obtidos foram comparados aos dados do semivariograma simulado. O SCJM apresentou melhor desempenho para os dados com estrutura de correlação espacial de modelo exponencial, mas principalmente, quando os dados não estavam normalmente distribuídos e continham *outliers*.

Palavras-chave: Estrutura de correlação espacial; Modelo exponencial; Semivariograma Cruzado.

4.1 Introdução

Quando se deseja descrever a correionalização de duas ou mais propriedades do solo, é necessário primeiramente estimar seu modelo de autocorrelação (definido como semivariograma) e então o variograma (ou semivariograma) cruzado (Lark, 2003).

O variograma cruzado entre duas variáveis aleatórias (Z_1 e Z_2) é utilizado para avaliar a existência de dependência espacial entre Z_1 e Z_2 e é definido por Cressie e Wikle (1998) como a variância de $Z_1(u) - Z_2(v)$, sendo u e v pontos do R^2 , expressa geralmente como a função bivariada espacial dos locais u e v . De acordo com os autores, há dois tipos de variograma cruzado propostos na literatura (Equações 4.1 e 4.2):

$$2v_{1,2}(u, v) \equiv cov[Z_1(u) - Z_1(v), Z_2(u) - Z_2(v)] \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$2\gamma_{1,2}(u, v) \equiv var[Z_1(u) - Z_2(v)] \quad (\text{Equação 4.2})$$

em que $u, v \in R^2$.

A modelagem do variograma cruzado difere da modelagem de variograma em pelo menos três aspectos: primeiro, porque o variograma cruzado não é necessariamente simétrico; segundo, porque não se espera que o variograma cruzado apresente o mesmo tipo de comportamento que o variograma, como por exemplo, um aumento em magnitude, com o aumento na distância e terceiro, não há nenhuma exigência que o variograma cruzado não seja negativamente definido (Rehman e Shapiro, 1996).

Pesquisadores na área de geoestatística têm apresentado ou utilizado diferentes variogramas cruzados a fim de obter um modelo que represente a verdadeira estrutura de correlação espacial entre duas variáveis. Cressie e Wikle (1998) apresentam um histórico do desenvolvimento destes variogramas cruzados, que será aqui complementado.

Nos anos 80, Myers (1982) apresentou uma forma matricial do problema geral de co-krigagem, concluindo, que a formulação matricial proporciona uma identificação clara das condições apropriadas e sugere uma simplificação nos métodos computacionais para modelagem do variograma cruzado. Wackernagel (1988) propôs a utilização da equação 4.1 para determinação da correlação espacial. Clark, Basinger e Harper (1989) propuseram um

pseudo-cross-variogram, que segundo Myers (1991) não é um variograma nem um variograma cruzado, mas pode ser usado na co-krigagem quando uma das variáveis não é medida em determinados pontos.

Nos anos 90, Rehman e Shapiro (1996) introduziram a modelagem de variogramas cruzados utilizando a transformada de Fourier, que são modelos capazes de fornecer variogramas cruzados anisotrópicos sobre espaços multidimensionais. Hoef e Barry (1998) apresentaram um método de construção de variograma cruzado através da integração de uma função de média móvel ao longo de um processo aleatório. Já nos anos 2000, Lark (2003) propôs dois estimadores robustos do variograma cruzado, que são resistentes à presença de *outliers*.

Vieira (2000) define o semivariograma cruzado (SC) conforme a equação 4.3:

$$\gamma_{1,2}(h) = \gamma_{2,1}(h) = \frac{1}{2} E\{[Z_1(x_i + h) - Z_1(x_i)][Z_2(x_i + h) - Z_2(x_i)]\} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Que pode ser estimado por:

$$\gamma_{1,2}(h) = \gamma_{2,1}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n \{[Z_1(x_i + h) - Z_1(x_i)][Z_2(x_i + h) - Z_2(x_i)]\} \quad (\text{Equação 4.4})$$

O estimador semivariograma cruzado é do tipo apresentado na equação 4.1.

Os dois tipos de variograma cruzado apresentados nas equações 4.1 e 4.2, medem a dependência cruzada entre duas variáveis medidas no espaço e em ambos, o variograma é considerado um caso especial para quando as duas variáveis são a mesma (Cressie e Wikle, 1998). Observa-se assim, que o estimador da semivariância proposto por Matheron (1962), definida na equação 4.5, é um caso especial do semivariograma apresentado na equação 4.4, quando $Z_1 = Z_2$.

O objetivo deste trabalho foi apresentar um estimador do semivariograma cruzado baseado em janelas móveis, obtido a partir do estimador do semivariograma proposto por Li e Lake (1994), compará-lo ao semivariograma cruzado e aplicá-lo a dados de atributos químicos e físicos do solo do experimento realizado.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Geração do modelo de correlação espacial

Conforme apresentado no Capítulo 1 (Item 1.2.5) o estimador clássico de Matheron (1962) e o estimador New1 (Li e Lake, 1994) da função semivariância são obtidos respectivamente pelas equações 4.5 e 4.6:

$$\hat{\gamma}_M(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (\text{Equação 4.5})$$

em que $\hat{\gamma}$: valor da semivariância estimada pelo estimador de Matheron, $N(h)$: número de pares separados por uma distância h , $Z(s)$: valor da variável Z no ponto s .

$$\hat{\gamma}_N(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{j \in D_{i,h}} [Z(s_i) - Z(s_j)]^2 \right\} \quad (\text{Equação 4.6})$$

em que $\hat{\gamma}_{N1}$: valor da semivariância estimada pelo estimador New1, n : número de pontos amostrais na área toda, $D_{i,h}$: conjunto indexado dos valores da variável Z em pontos de uma janela móvel bi-dimensional de área $\Delta_{i,h}$ e tamanho h , centrada no bloco i , excluindo o ponto s_i e m : número de pares em $D_{i,h}$.

O estimador semivariograma cruzado (Equação 4.4) da função semivariância cruzada é obtido a partir do semivariograma proposto por Matheron (1962), considerando-se duas variáveis distintas Z_1 e Z_2 .

Neste sentido, propomos a extensão do estimador New1 (Equação 4.6) para o caso de duas variáveis distintas Z_1 e Z_2 para fins de avaliar a correlação cruzada entre estas variáveis utilizando janelas móveis, conforme a equação 4.7.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{j \in D_{i,h}} [Z_1(s_i) - Z_1(s_j)][Z_2(s_i) - Z_2(s_j)] \right\} \quad (\text{Equação 4.7})$$

No entanto, quando a equação 4.7 foi aplicada aos dados simulados (4.2.2), observou-se que os valores do semivariograma cruzado apresentavam 1% do valor real da semivariância cruzada. Assim, multiplicou-se por 100 a fim de obter o valor real do semivariograma cruzado. O estimador do semivariograma cruzado baseado em janelas móveis (SCJM) é apresentado na equação 4.8.

$$\hat{\gamma}_{SCJM}(h) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{j \in D_{i,h}} [Z_1(s_i) - Z_1(s_j)][Z_2(s_i) - Z_2(s_j)] \right\} \quad (\text{Equação 4.8})$$

em que $\hat{\gamma}_{SCJM}$: valor da semivariância cruzada utilizando janelas móveis, entre as variáveis Z_1 e Z_2 , n : número de pontos amostrais na área toda, $D_{i,h}$: conjunto indexado dos valores das variáveis Z_1 e Z_2 em pontos de uma janela móvel bi-dimensional de área $\Delta_{i,h}$ e tamanho h , centrada no bloco i , excluindo o ponto s_i e m : número de pares em $D_{i,h}$.

4.2.2 Simulação de dados e comparação dos modelos de correlação espacial

Foram simulados 180 conjuntos de dados referentes à duas variáveis (Z_1 e Z_2 , sendo 90 para cada variável) com estruturas de correlação espacial definidas na tabela 4.1, com auxílio dos pacotes *gstat* (Pebesma, 2004) e *RandomFields* (Schlather et al., 2014) do software R (R Core Team, 2014). Cada conjunto de dados representa valores de 400 pontos espaçados entre si por uma distância mínima de uma unidade, dispostos em uma malha de 20 x 20. Foram escolhidos alcances que representavam 25% e 17% da distância máxima considerando um *cutoff* de 50% da distância máxima, conforme sugerido pela literatura (Clark, 1979), efeito pepita (C_0) igual a zero em todos os conjuntos gerados e patamar (C) igual a 1,0; 1,5 e 2,0 unidades considerando $\theta = (C_0; C; a)$ (Tabela 4.1). Cada conjunto de duas variáveis (Z_1 e Z_2) apresenta então estrutura de correlação simulada de acordo com um modelo teórico (MT), com efeito pepita igual a C_0 , patamar igual a C e alcance igual a a .

C_0 representa o valor da correlação cruzada quando a distância é nula, ou seja, no próprio ponto. Por este motivo, foi considerada igual a 0 em todas as simulações. a representa a distância h dentro da qual os dados apresentam correlação espacial e tem valor de semivariância cruzada igual a C . Os modelos teóricos escolhidos para a simulação foram:

esférico (Esf), exponencial (Exp) e gaussiano (Gau), conforme apresentados nas equações 4.9 a 4.11, respectivamente.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] & \text{se } 0 < h < a \\ C_0 + C_1 & \text{se } a \leq h \end{cases} \quad (\text{Equação 4.9})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right) \quad (\text{Equação 4.10})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (\text{Equação 4.11})$$

em que $\gamma(h)$: semivariância, C_0 : efeito pepita, $C_1 = C - C_0$, a : alcance e h : distância.

Para cada estrutura de correlação espacial apresentada na tabela 4.1, foram geradas cinco repetições.

Tabela 4.1 – Estrutura de correlação espacial adotadas para geração de conjuntos de dados utilizados na comparação entre o semivariograma cruzado e o semivariograma cruzado baseado em janelas móveis

Modelo Teórico (MT)	Efeito pepita (C_0)	Contribuição (C_1)	Alcance (a)	(MT; C_0 ;C; a)
Esférico (Esf)	0	1,0	7	(Esf;0;1,0;7)
	0	1,5	7	(Esf;0;1,5;7)
	0	2,0	7	(Esf;0;2,0;7)
	0	1,0	5	(Esf;0;1,0;5)
	0	1,5	5	(Esf;0;1,5;5)
	0	2,0	5	(Esf;0;2,0;5)
Exponencial (Exp)	0	1,0	7	(Exp;0;1,0;7)
	0	1,5	7	(Exp;0;1,5;7)
	0	2,0	7	(Exp;0;2,0;7)
	0	1,0	5	(Exp;0;1,0;5)
	0	1,5	5	(Exp;0;1,5;5)
	0	2,0	5	(Exp;0;2,0;5)
Gaussiano (Gau)	0	1,0	7	(Gau;0;1,0;7)
	0	1,5	7	(Gau;0;1,5;7)
	0	2,0	7	(Gau;0;2,0;7)
	0	1,0	5	(Gau;0;1,0;5)
	0	1,5	5	(Gau;0;1,5;5)
	0	2,0	5	(Gau;0;2,0;5)

Cada conjunto de duas variáveis foi aplicado ao SC e ao SCJM. Os valores da correlação espacial obtidos pela aplicação dos dados simulados ao SC e ao SCJM (estimados), foram comparados aos valores que representavam a verdadeira estrutura de correlação espacial (simulados), obtidos pelos modelos teóricos (equações 4.9 a 4.11), utilizando a média da soma do quadrado da diferença entre os valores simulados e os estimados pelo SC e SCJM das cinco repetições (Equação 4.12):

$$\sum_{i=1}^r [\gamma(h_i) - \gamma(h_i, \theta)]^2 \quad (\text{Equação 4.12})$$

em que $\theta = (C_0; C_1; a)$, $\gamma(h_i)$ é o valor da semivariância cruzada estimada pelos estimadores dados nas equações (4.9) a (4.11) no ponto h_i ; $\gamma(h_i, \theta)$ é o valor verdadeiro da semivariância cruzada simulada com θ definido e r é o número de lags (pontos do semivariograma cruzado).

Na sequência, foram construídos outros 180 conjuntos de dados, com estruturas de correlação espacial idênticas às apresentadas na tabela 4.1, porém, contaminados com pontos *outliers* e sem distribuição normal de probabilidade, com auxílio do pacote `RandomFields` (Schlather et al., 2014) do software R (R Core Team, 2014), para validar o modelo SCJM, uma vez que segundo Li e Lake (1994), o semivariograma proposto por Matheron não apresenta eficiência na presença de *outliers* e com dados não normalmente distribuídos.

Os conjuntos de dados simulados foram aplicados ao SC e ao SCJM e foi novamente realizada a comparação utilizando a média da soma do quadrado da diferença entre os valores simulados e os estimados pelo SC e SCJM das cinco repetições.

4.2.3 Avaliação da correlação espacial dos atributos físicos e químicos do solo

Foram construídos os semivariogramas cruzados entre os atributos físicos e químicos do solo e o rendimento de grãos e teor de óleo do crambe, utilizando o SCJM, cujo script foi construído para ser compilado no software R (R Core Team, 2014), conforme o Anexo E.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Análise de dados simulados

A tabela 4.2 apresenta a média das somas dos quadrados das diferenças entre os valores simulados pelo modelo teórico escolhido e os valores estimados pelo SC e SCJM, das cinco repetições. Os valores destacados em negrito representam as somas dos quadrados das diferenças entre os valores simulados e os estimados nos quais o SCJM apresentou melhor desempenho que o SC. Observa-se que o SC e o SCJM apresentaram desempenho semelhante para o modelo esférico. O SCJM apresentou melhor desempenho para dados com correlação espacial de acordo com o modelo exponencial. Já para o modelo gaussiano, o SC apresentou melhor desempenho.

Tabela 4.2 – Somas dos quadrados das diferenças entre a semivariância cruzada simulada e estimada pelo SCJM e SC

Modelo ($C_0;C_1;a$)	Esférico		Exponencial		Gaussiano	
	SC	SCJM	SC	SCJM	SC	SCJM
(0;1,0;7)	0,616	0,307	2,522	1,906	0,635	0,829
(0;1,5;7)	0,814	1,043	3,701	3,651	2,214	2,146
(0;2,0;7)	0,565	2,266	8,255	6,598	3,921	6,042
(0;1,0;5)	0,238	0,217	1,038	0,172	0,776	1,241
(0;1,5;5)	3,264	1,559	3,319	2,888	3,176	4,948
(0;2,0;5)	0,257	1,066	5,417	3,239	3,498	5,542

Obs.: Os valores em negrito representam as simulações em que o SCJM apresentou melhor desempenho.

O SCJM superestima os valores da correlação cruzada para dados muito próximos e para dados muito distantes quando o modelo esférico é utilizado (Figura 4.1). O SC, embora apresente bom desempenho para as distâncias iniciais, superestima os valores da correlação cruzada quando a distância aumenta.

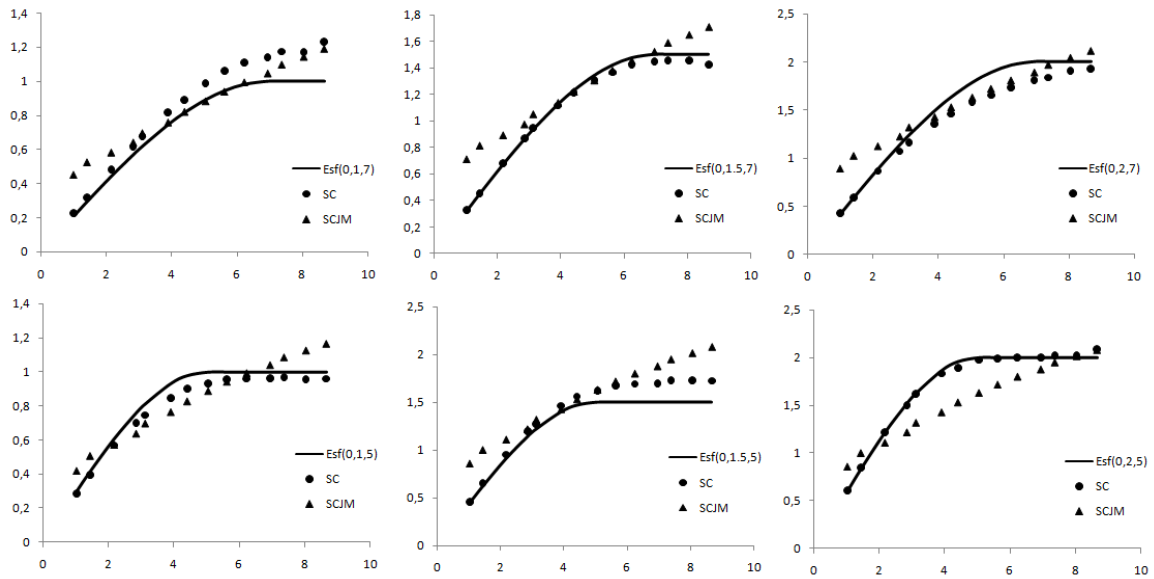


Figura 4.1 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Esférico.

Tanto o SC quanto o SCJM apresentam valores subestimados da correlação cruzada na utilização do modelo exponencial, porém, o SCJM aproxima melhor os valores da estrutura simulada (Figura 4.2).

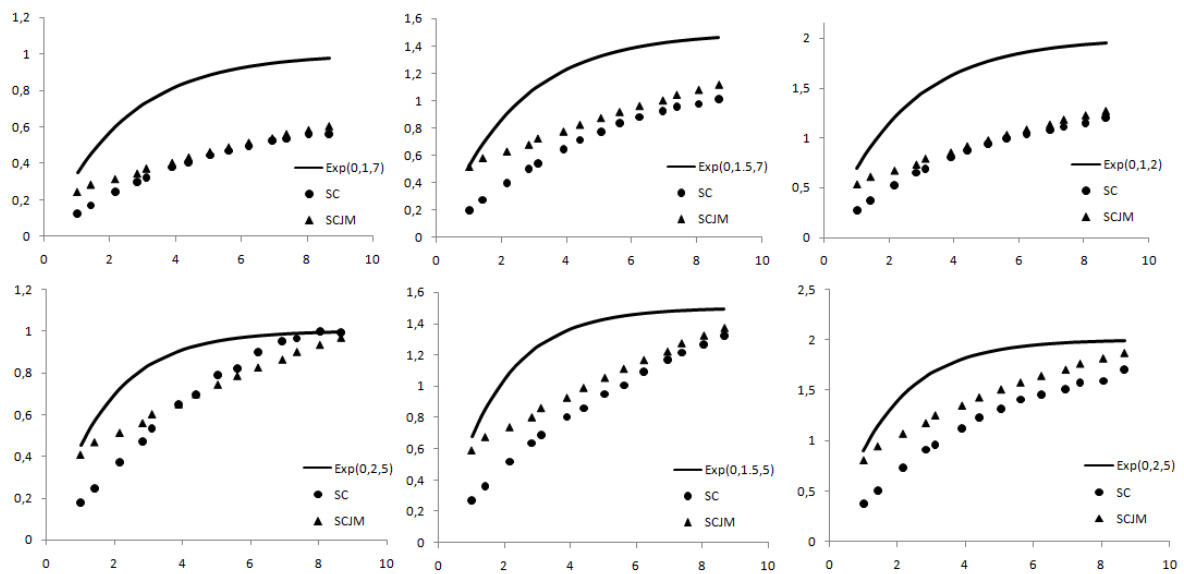


Figura 4.2 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Exponencial.

Ambos SC e SCJM apresentaram valores subestimados da correlação cruzada na utilização do modelo teórico gaussiano, porém, o SC apresentou valores mais próximos aos simulados (Figura 4.3).

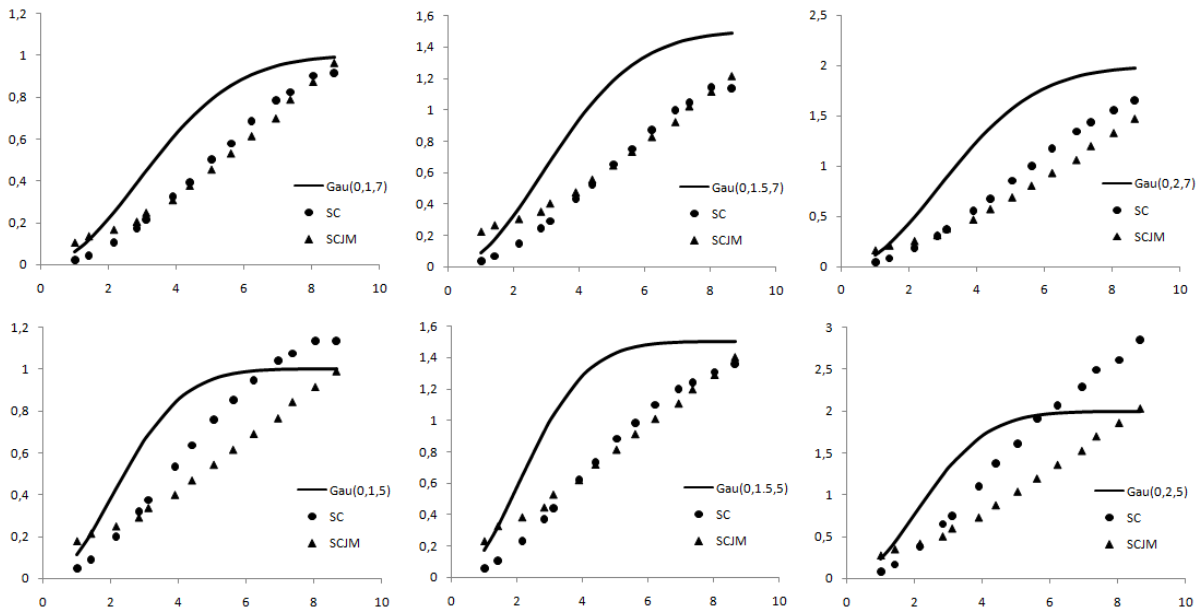


Figura 4.3 – Comparação entre o semivariograma simulado e os semivariogramas estimados pelo SC e SCJM utilizando o modelo Gaussiano.

Em geral, o SCJM apresentou bom desempenho quando comparado ao SC nos modelos esférico e exponencial. No entanto, quanto ao gaussiano, o SC apresentou desempenho superior.

A tabela 4.3 apresenta a média das somas dos quadrados das diferenças entre os valores simulados pelo modelo teórico escolhido e os valores estimados pelo SC e SCJM, das cinco repetições, dos dados contaminados com *outliers* e sem distribuição normal de probabilidade. Observa-se que o SCJM apresentou melhor desempenho para dados com correlação espacial de acordo com os modelos esférico e exponencial. Isto pode ser explicado devido ao fato de que nos estimadores que não utilizam as janelas móveis o $N(h)$ diminui com o aumento de h , que é a principal fonte de sua imprecisão (Li e Lake, 1994) e ainda pelo fato do SCJM utilizar uma janela e não uma linha, os dados irregulares tem menor efeito sobre a estimação da correlação cruzada. Já para o modelo gaussiano, o SC apresentou melhor desempenho.

Tabela 4.3 – Somas dos Quadrados das diferenças entre a semivariância cruzada simulada e estimada pelos SCJM e SC, para dados contaminados com pontos discrepantes e sem distribuição de normalidade

Modelo ($C_0;C_1;a$)	Esférico		Exponencial		Gaussiano	
	SC	SCJM	SC	SCJM	SC	SCJM
(0;1,0;7)	11,281	0,210	0,489	1,566	0,679	2,160
(0;1,5;7)	1,748	0,696	3,483	1,728	1,009	3,298
(0;2,0;7)	16,882	2,065	2,665	0,194	1,235	1,051
(0;1,0;5)	0,437	1,473	1,615	0,229	0,227	0,519
(0;1,5;5)	5,866	2,047	0,657	0,410	0,607	1,088
(0;2,0;5)	0,613	0,952	9,165	0,449	1,535	2,042

Obs.: Os valores em negrito representam as simulações em que o SCJM apresentou melhor desempenho.

4.3.2 Análise dos dados reais

A figura 4.4 apresenta os semivariogramas cruzados entre o Al e rendimento de grãos do crambe e o pH e rendimento de grãos do crambe em 2012 e 2013, obtidos pelo SCJM.

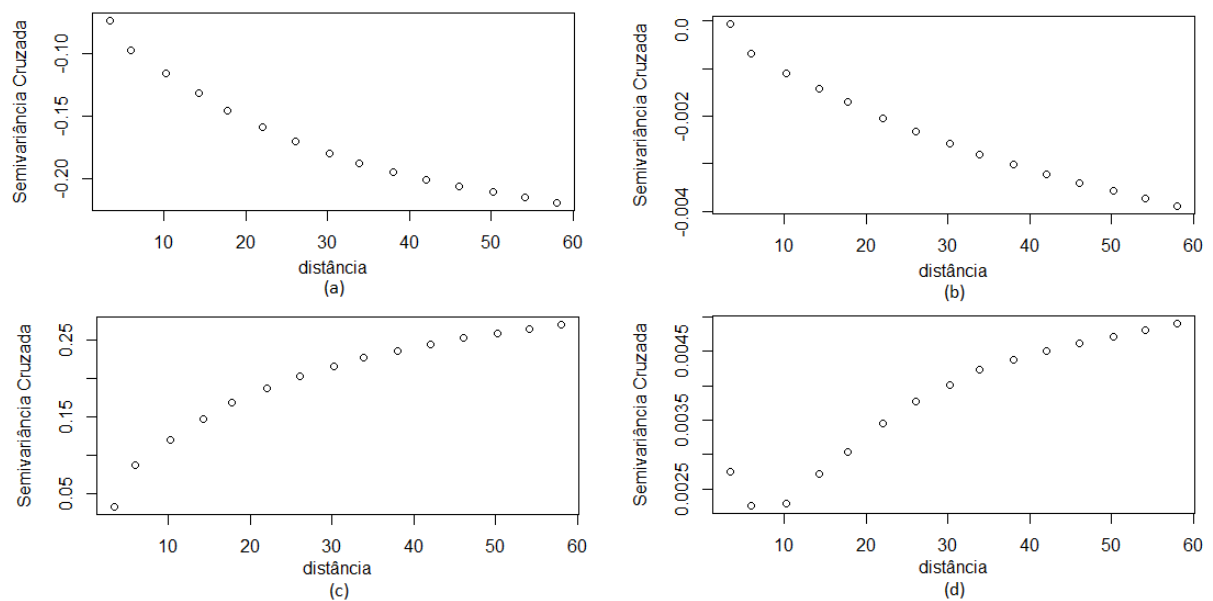


Figura 4.4 – Semivariograma cruzado entre Al e rendimento de grãos do crambe em 2012 (a) e 2013 (b) e entre pH e rendimento de grãos do crambe em 2012(c) e 2013 (d).

Observa-se na figura 4.4 que o Al tem correlação espacial inversa com o rendimento de grãos do crambe. O pH, nesta faixa de variação (4,5 – 6,2) apresenta correlação direta com o rendimento de grãos do crambe.

A figura 4.5 apresenta a correlação espacial entre os macronutrientes em estudo (Ca, K, Mg, N e P) e o rendimento de grãos do crambe nos Anos 2012 e 2013. Observa-se na figura 4.5 que todos os macronutrientes têm correlação espacial direta com o rendimento de grãos do crambe.

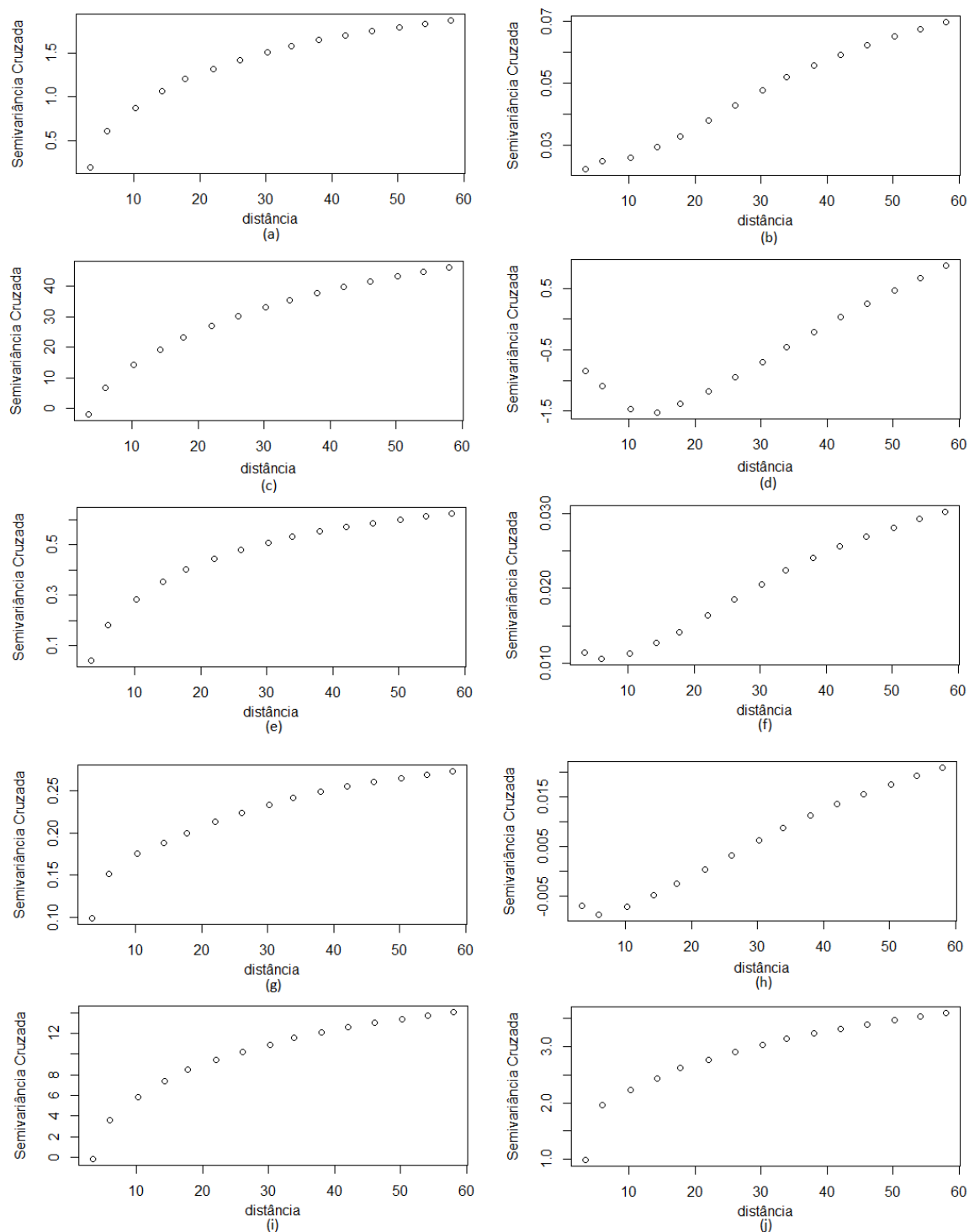


Figura 4.5 – Semivariograma cruzado entre Ca e rendimento de grãos do crambe em 2012 (a) e 2013 (b); entre K e rendimento de grãos do crambe em 2012 (c) e 2013 (d); entre Mg e rendimento de grãos do crambe em 2012 (e) e 2013 (f); entre N (MO) e rendimento de grãos do crambe em 2012 (g) e em 2013 (h); e entre P e rendimento de grãos do crambe em 2012 (i) e 2013 (j).

A figura 4.6 apresenta a correlação espacial entre os atributos químicos em estudo e o teor de óleo do crambe. Observa-se que apenas o Al e o N (MO) têm correlação espacial inversa com o rendimento de grãos do crambe.

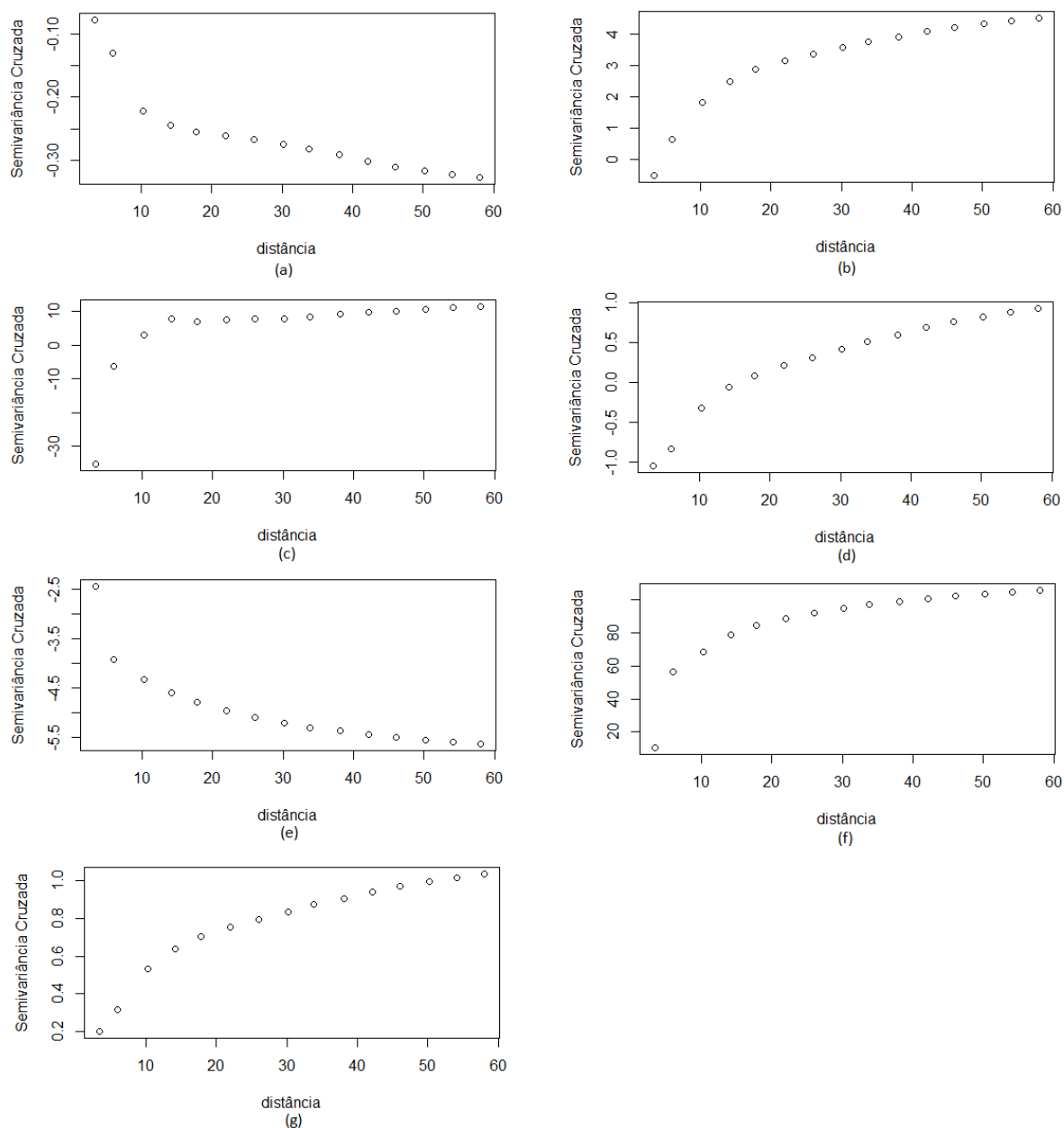


Figura 4.6 – Semivariograma cruzado entre o rendimento de grãos do crambe e Al (a) rendimento de grãos do crambe e Ca (b), rendimento de grãos do crambe e K (c), rendimento de grãos do crambe e Mg (d), rendimento de grãos do crambe e N (MO), rendimento de grãos do crambe e P (f) e rendimento de grãos do crambe e pH (g) em 2012.

A figura 4.7 apresenta a correlação espacial entre Ds e o rendimento de grãos do crambe nas três camadas em estudo, antes e após o primeiro cultivo do crambe. Antes do plantio do crambe, há correlação espacial direta entre Ds e rendimento de grãos nas três camadas avaliadas e após a colheita do crambe, direta na primeira camada e inversa nas demais.

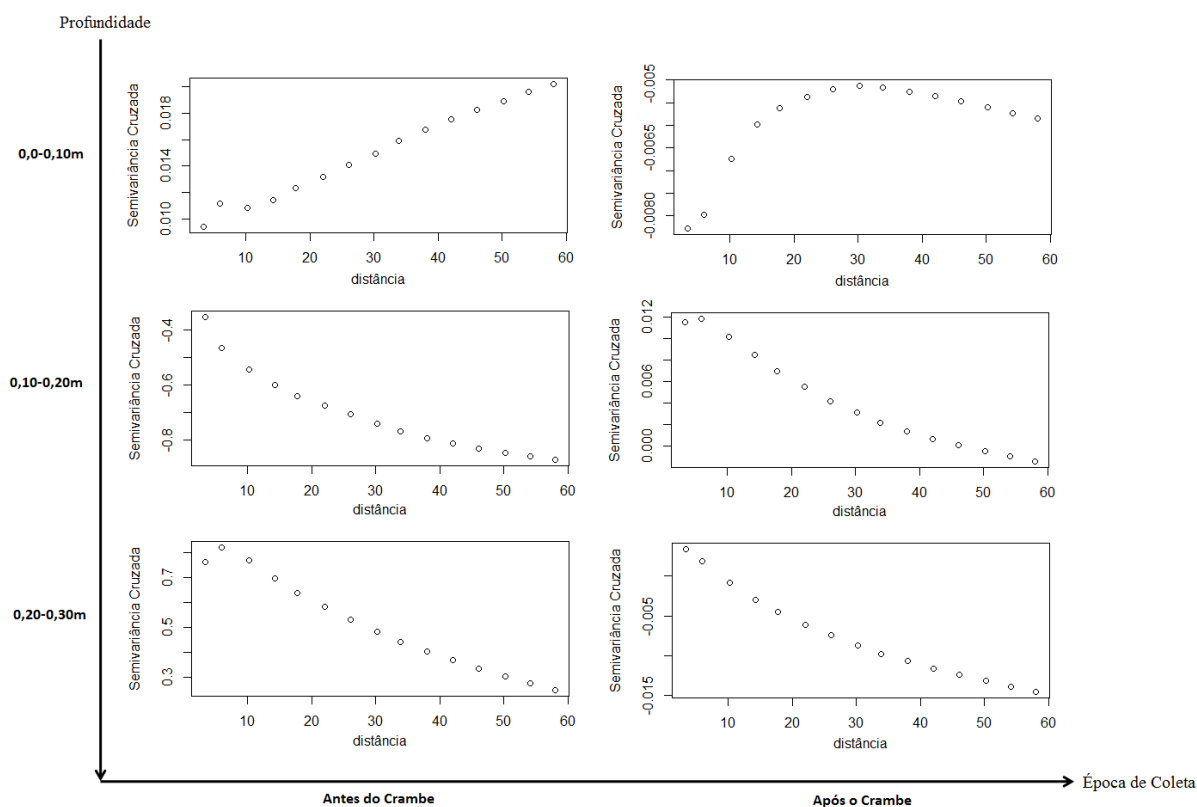


Figura 4.7 – Semivariograma cruzado entre a Ds e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas

A figura 4.8 apresenta a correlação espacial entre a macro e o rendimento de grãos do crambe nas três camadas em estudo, antes e após o primeiro cultivo do crambe. Há correlação espacial inversa entre macro e rendimento de grãos, apenas na segunda e terceira camadas antes do plantio.

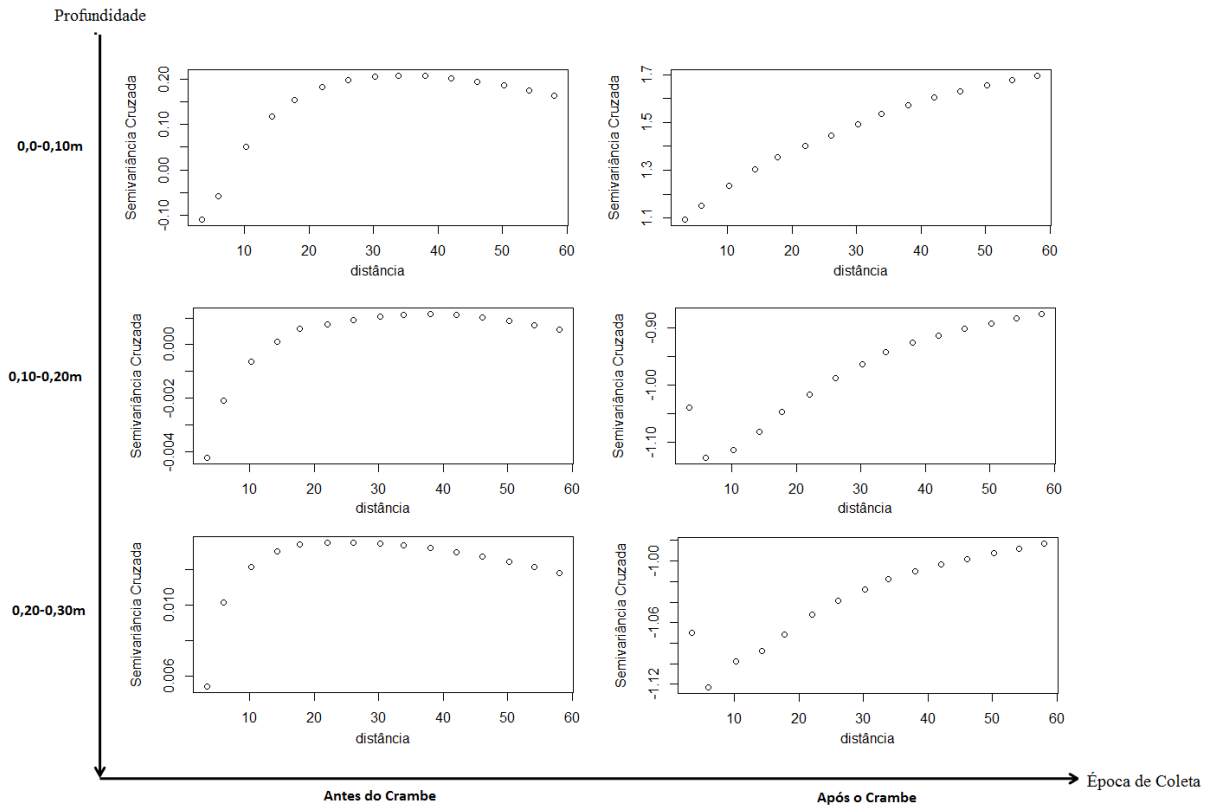


Figura 4.8 – Semivariograma cruzado entre a macro e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas.

A figura 4.9 apresenta a correlação espacial entre a micro e o rendimento de grãos do crambe nas três camadas em estudo, antes e após o primeiro cultivo do crambe. Na camada de 0,0-0,10m há correlação espacial inversa entre micro e rendimento de grãos, nas duas coletas e direta nas demais.

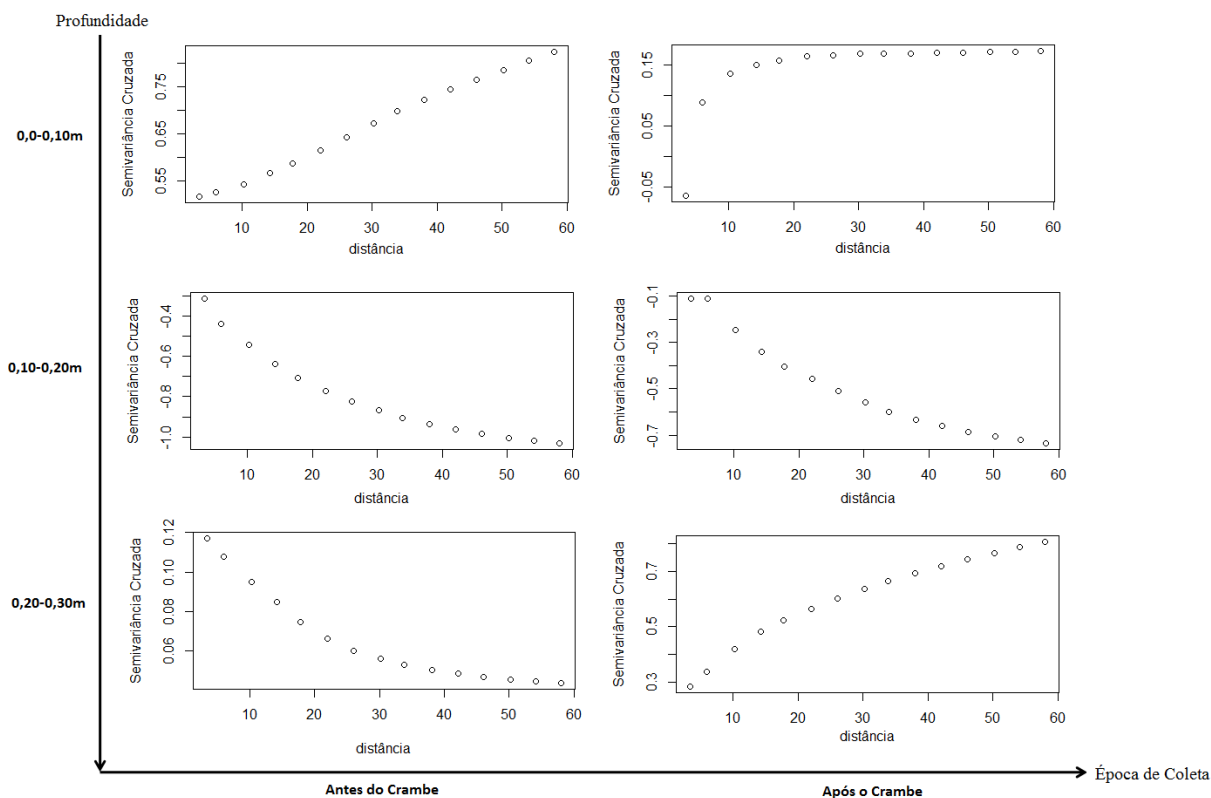


Figura 4.9 – Semivariograma cruzado entre a micro e rendimento de grãos do crambe antes e após o primeiro cultivo do crambe nas três camadas avaliadas.

A figura 4.10 apresenta a correlação espacial entre o teor de óleo do crambe e a D_s , a macro e a micro nas três camadas em estudo após o primeiro cultivo do crambe. Há correlação inversa apenas entre o teor de óleo e a D_s na camada de 0,0-0,10m e em todas as camadas com a micro. Nas demais camadas há correlação direta.

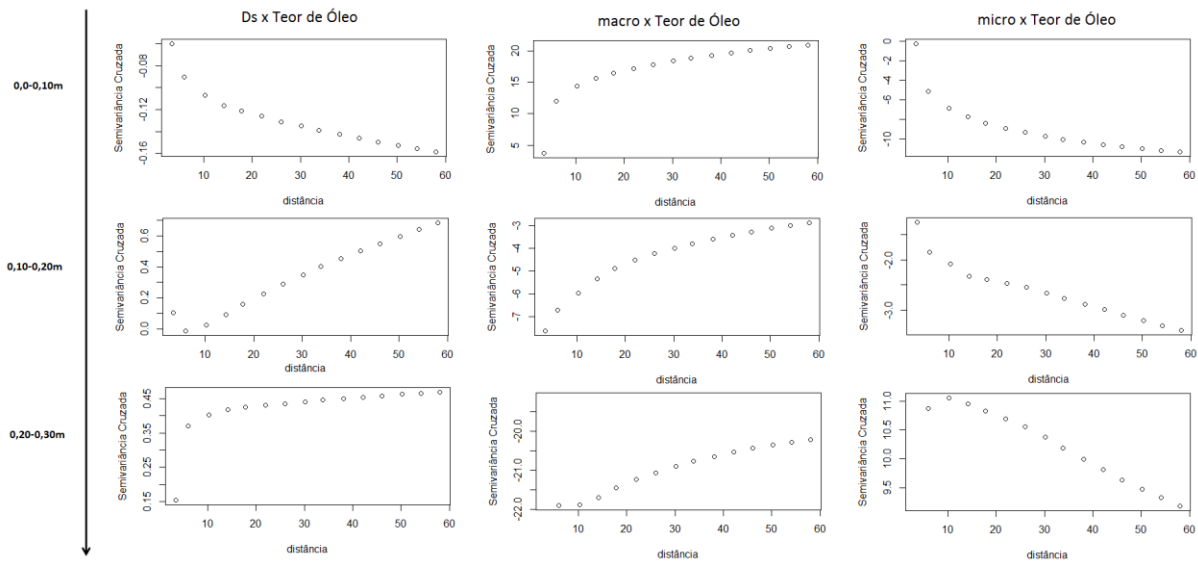


Figura 4.10 – Semivariograma cruzado entre o teor de óleo do crambe e Ds, macro e micro nas três camadas, após o primeiro cultivo do crambe, nas três camadas avaliadas.

4.4 Conclusões

- O semivariograma cruzado baseado em janelas móveis apresenta melhor desempenho que o semivariograma cruzado quando os dados contêm *outliers* e não apresentam distribuição normal de probabilidade.
- O semivariograma cruzado baseado em janelas móveis detecta a estrutura de correlação espacial entre os atributos físicos e químicos do solo, independente de sua variabilidade ou dispersão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a conscientização ambiental que estamos desenvolvendo nos últimos anos, estudar culturas agrícolas que sirvam adequadamente como matéria-prima para a produção de biocombustíveis é uma premissa para os pesquisadores. O crambe é uma alternativa viável para produção de biocombustível pelo alto teor de óleo que apresenta, além de outras características agronômicas já discutidas anteriormente.

Neste sentido, o conhecimento da correlação espacial entre atributos do solo e o rendimento de grãos do crambe é de grande importância na tomada de decisões a respeito do uso e manejo regionalizado do solo, visando aumento da produtividade e teor de óleo da cultura. Esta avaliação da correlação espacial não tem alavancado muitas pesquisas para esta cultura, sobretudo pelo fato do crambe estar sendo implantado no Brasil há pouco tempo e não ser uma cultura de rendimento homogêneo ao longo da área.

Acredita-se que, com este trabalho, foi possível identificar quais atributos físicos e químicos do solo influenciam o rendimento de grãos e o teor de óleo do crambe, além de avaliar o que ocorre quando a cultura é implementada em solo com compactação adicional.

A grande contribuição do Capítulo 1 foi a observação de que o aumento na densidade do solo e da resistência do solo à penetração, causado pela compactação do solo altera a relação fonte:dreno do crambe, o que repercute na produção de grãos com maior teor de óleo, porém com rendimento de grãos reduzido. Além do fato de que se comprovou neste capítulo, que após dois anos de cultivo do crambe, não houve redução dos valores de densidade do solo em todas as camadas avaliadas, o que não evidencia o potencial estruturante das raízes do crambe.

O Capítulo 2 contribui no conhecimento de que a combinação alta densidade e baixa condutividade hidráulica do solo saturado gera redução do rendimento de grãos do crambe, porém aumento no teor de óleo.

Um esquema amostral adequado para a coleta de dados para a avaliação da variabilidade e correlação espacial também foi discutido neste trabalho, uma vez que para aplicação da Agricultura de Precisão, a qualidade da malha amostral e quantidade adequada de amostras são de fundamental importância na geração de mapas mais precisos. No Capítulo 3, além de se verificar que os atributos químicos que mais apresentam relação espacial com o rendimento de grãos do crambe foram o fósforo e a matéria orgânica, também se avaliou o

esquema amostral mais adequado para detecção da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e do rendimento de grãos e de óleo do crambe. Concluiu-se neste capítulo, que malhas amostrais constituídas de pontos espaçados a grandes distâncias não são eficazes na detecção de tal variabilidade espacial, ao contrário do que muitos prestadores de serviço da Agricultura de Precisão têm feito, ao escolherem malhas amostrais com apenas uma amostra a cada hectare, sugere-se neste trabalho que sejam escolhidos o maior número de amostras possível.

A correlação espacial entre variáveis normalmente é feita pela análise do semivariograma cruzado. Um estimador da semivariância cruzada, que tem como base o semivariograma desenvolvido por Matheron (1962). O problema deste estimador é que pode não apresentar bom comportamento quando os dados não são normalmente distribuídos, ou na presença de *outliers*. Neste sentido, o Capítulo 4 contribui nesta área, apresentando um estimador da correlação espacial baseado em janelas móveis, que se mostrou mais eficiente quando os dados apresentavam *outliers* e não tinham distribuição normal de probabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU, S. T.; MALGWI, W. B. Spatial variability of soil physic-chemical properties in kadawa irrigation project in Sudan Savanna Agroecology of Nigeria. **International Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 10, p. 714-735, 2011. doi: 10.3923/ijar.2011.714.735.

ALAMEDA, D.; VILLAR, R. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. **Environmental and Experimental Botany**, v. 79, p. 49-57, 2012. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.01.004.

ALAOUI, A.; HELBLING, A. Evaluation of soil compaction using hydrodynamic water content variation: comparison between compacted and non-compacted soil. **Geoderma**, v. 134, p. 97-108, 2006. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.08.016.

ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil & Tillage Research**, v. 115-116, p. 1- 15, 2011. doi: :10.1016/j.still.2011.06.002.

BANGITA, B. & RAO, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum* spp.) under zonal tillage system. **Geoderma**, 189: 351-356, 2012. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.07.002.

BEJARANO, M. D.; VILLAR, R.; MURILLO, A. M.; QUERO, J. L. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 108-114, 2010. doi: 10.1016/j.still.2010.07.008.

BIVAND, R. **classInt: Choose univariate class intervals**. R package version 0.1-21. <http://CRAN.R-project.org/package=classInt>, 2013.

BONINI, A. K.; SECCO, D.; SANTOS, R. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, p. 1543-1548, 2011. doi: 10.1590/S0103-84782011005000122.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. doi: 10.1590/S1806-66902013000100001.

BROCCA, L.; MORBIDELLI, R.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 356-373, 2007. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.004.

BUCZKO, U.; BENS, O.; BURNER, W. Spatial and temporal variability of water repellency in asandy soil contaminated with tar oil and heavy metals. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 88, p. 249-268, 2006. doi:10.1016/j.jconhyd.2006.07.002.

BURGOS, P.; MADEJÓN, E.; PÉREZ-DE-MORA, A.; CABRERA, F. Horizontal and vertical variability of soil properties in a trace element contaminated area. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 11-25, 2008. doi:10.1016/j.jag.2007.04.001.

BURGOS, P.; MADEJÓN, E.; PÉREZ-DE-MORA, A.; CABRERA, F. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. **Geoderma**, v. 130, p. 157-175, 2006. doi:10.1016/j.geoderma.2005.01.016.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106, 2012. doi: 10.1016/j.catena.2012.07.016.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 617-630, 2010. doi: 10.1590/S0100-06832010000300003.

CAON, D.; GENUÍ, A. M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 629-639, 2013. doi: 10.1590/S1415-43662013000600009.

CARLSSON, A. S. Plant oils as feedstock alternatives to petroleum – A short survey of potential oil crop platforms. **Biochimie**, v. 91, p. 665-670, 2009. doi: 10.1016/j.biochi.2009.03.021.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 237-243, 2011. doi: 10.1590/S1415-43662011000300003.

CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 613-620, 2012. doi: 10.1590/S0100-204X2012000400018.

CHAMPOLIVIER, L.; MERRIEN, A. Effects of water stress applied at different growth stages to *Brassica napus* L. var. *oleifera* on yield, yield components and seed quality. **European Journal of Agronomy**, v. 5, p. 153-160, 1996. PII S1161-0301(96)02004-7.

CHANCELLOR, W. J. Effects of compaction on soil strength. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W. M. & TAYLOR, H. M., eds. **Compaction of Agricultural Soils**. St. Joseph: American Society of Engineering, p. 190-222, 1971.

CLARK, I. **Practical geostatistic**. London: Applied science publishers LTD, 1979, 129 p.

CLARK, I.; BASINGER, K.; HARPER, W. V. MUCK: A Novel Approach to Co-Kriging. in B. E. Buxton (Ed.), **Proceedings of the Conference on Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty: Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling**: Batelle Press, Columbus, p. 473-494, 1989.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade Espacial da Resistência Mecânica à Penetração em Vertissolo Cultivado com Manga no Perímetro Irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 755-763, 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000300007.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assesing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publisher, 1999, 130p.

CONNOR, D. J.; SADRAS, V. O. Physiology of yield expression in sunflower. **Field Crops Research**. v. 30, p. 333-389, 1992. doi: 10.1016/0378-4290(92)90006-U.

CRESSIE, N.; WIKLE, C. K. The variance-based cross-variogram: you can add apples and oranges. **Mathematical Geology**, v. 30, n. 7, p. 789-799, 1998.

CRUZ, V. M. V.; DIERIG, D. A. Trends in literature on new oilseed crops and related species: Seeking evidence of increasing or waning interest. **Industrial Crops and Products**, v. 37, p. 141-148, 2012. doi:10.1016/j.indcrop.2011.11.029.

DABDOUB, M. J.; BRONZEL, J. L. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 776-792, 2009. doi: 10.1590/S0100-40422009000300021.

DALCHIAVON, F. C.; PASSOS E CARVALHO, M.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Sugarcane productivity correlated with physical-chemical attributes to create soil management zone. **Revista Ceres**, v. 60, n. 5, p. 706-714, 2013.

DAM, J. V.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. P. C. From the global efforts on certification of bioenergy towards an integrated approach based on sustainable land use planning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2445-2472, 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.07.010.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR., P. J. **Model Based Geostatistics Springer**, New York, 2007.

DONGLI, S.; MING'AN, S.; WEI, H.; SHUANG'EN, Y. Variability of soil water-physical properties in a small catchment of the Loess Plateau, China. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 22, p. 3041-3049, 2010. doi: 10.5897/AJAR/A0AF65540212.

DUARTE, T. S.; PEIL, R. M. N. Relações fonte: dreno e crescimento vegetativo do meloeiro. **Horticultura Brasileira**, v. 28, p. 271-276, 2010. doi: 10.1590/S0102-05362010000300005.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Brasil, 3. ed., 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA. 1997, 212 p.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 6-16, 1998.

FALASCA, S. L.; FLORES, N.; LAMAS, M. C.; CARBALLO, S. M.; ANSCHAU, A. *Crambe abyssinica*: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 5808-5812, 2010. doi: 10.1590/S0034-737X2013000500015.

FIGLIAREZZA, A. C. C. L.; TOMAZ, C. A.; FIGLIAREZZA, S. L.; PILON, C.; ZANOTTO, M. D. Genetic diversity among progenies of *Crambe abyssinica* Hochst for seed traits. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 771-775, 2013. doi: 10.1016/j.indcrop.2013.07.039.

GALLARDO, A.; PARAMÁ, R. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain. **Geoderma**, v. 139, p. 199-208, 2007. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.01.022.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009. doi: 10.1590/S0103-84782009000100011.

GNANSOUNOU, E. Assessing the sustainability of biofuels: A logic-based model. **Energy**, v. 36, p. 2089-2096, 2011. doi:10.1016/j.energy.2010.04.027.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v. 37, p. 1-10, 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000100001.

HENNECKE, A. M.; FAIST, M.; REINHARDT, J.; JUNQUERA, V.; NEEFT, J.; FEHRENBACH. Biofuel greenhouse gas calculations under the European Renewable Energy Directive – A comparison of the BioGrace tool vs. the tool of the Roundtable on Sustainable Biofuels. **Applied Energy**, v. 102, p. 55-62, 2013. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.04.020.

HOEF, J. M. V.; BARRY, R. P. Constructing and fitting models for cokriging and multivariable spatial prediction. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 69, p. 275-294, 1998.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A.; SEKI, A. S.; BUENO, O. C. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 395-403, 2010b. doi: 10.1590/S0100-69162010000300004.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; ROBERTO, P.; SILVA, A. Comparação do custo de produção do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) com outras culturas oleaginosas em sistema plantio direto. **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 4, p. 141-153, 2010a.

JUAN, W.; PUTE, W.; XINING, Z. Soil infiltration based on BP neural network and grey relation analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 97-105, 2013. doi:10.1590/S0100-06832013000100010.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v. 32, p. 945-953, 2002. doi: 10.1590/S0103-84782002000600006.

KOH, L. P.; GHAZOUL, J. Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. **Biological Conservation**, v. 141, p. 2450-2460, 2008. doi:10.1016/j.biocon.2008.08.005.

KOMSTA, L.; NOVOMESTKY, F. **moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests**. R package version 0.13. <http://CRAN.R-project.org/package=moments>, 2012.

KRIPPENDORFF, K. **Content Analysis: an Introduction to its Methodology**. Beverly Hills: Sage Publications. 1980. 189p.

LALAS, S.; GORTZI, O.; ATHANASIADIS, V.; DOURTOGLOU, E.; DOURTOGLOU, V. Full characterisation of *Crambe abyssinica* Hochst. Seed Oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 89, p. 2253-2258, 2012. doi: 10.1007/s11746-012-2122-y.

LANNOY, G. J. M.; VERHOEST, N. E. C.; HOUSER, P. R.; GISH, T. J.; MEIRVENNE, M. V. Spatial and temporal characteristics of soilmoisture in an intensively monitored agriculturalfield (OPE3). **Journal of Hydrology**, n. 331, p. 719-730, 2006. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.016.

LARK, R. M. Two robust estimators of the cross-variogram for multivariate geostatistical analysis of soil properties. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 187-201, 2003.

LI, D.; LAKE, L. W. A moving window semivariance estimator. **Water Resources Research**. Austin, v. 30, n. 5, p. 1479-1489, 1994. doi: 10.1029/94WR00319.

LI, X.; AHLMAN, A.; LINDGREN, H.; ZHU, L-H. Highly efficient in vitro regeneration of the industrial oilseed crop *Crambe abyssinica*. **Industrial Crops and Products**, v. 33, p. 170-175, 2011. doi: 10.1016/j.indcrop.2010.10.004.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 16-23, 2013. doi: 10.1590/S0100-06832010000100002.

LUNELLI, I. E.; SECCO, D.; MARINS, A. C.; ROSA, H. A.; SANTOS, R. F.; BORSOI, A.; VELOSO, G.; BARICCATTI, R. A.; SOUZA, S. N. M.; SILVA, T. R. B. Effects of nutritional arrangements of NPK on the yield of grains and *Crambe* oil cultivation. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, p. 2048-2052, 2013. doi: 10.5897/AJAR12.1154.

MARINS, A. C.; NAVA, D. T.; SECCO, D.; ROSA, H. A.; VELOSO, G.; REICHERT, J. M. *Crambe* (*Crambe abyssinica* Hochst) yield as affected by soil physical properties: Linear and spatial correlations. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, p. 5949-5954, 2012. doi: 10.5897/AJAR12.2052.

MARKEVICIUS, A.; KATINAS, V.; PEREDNIS, E.; TAMASAUSKIENE, M. Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 3226-3231, 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.07.015.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. **Soil & Tillage Research**, v. 49, n. 3, p. 185-199, 1998. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00169-X.

MARTINS, L. D.; COSTA, F. P.; LOPES, J. C.; RODRIGUES, W. N. Influence of pre-germination treatments and temperature on the germination of crambe seeds (*Crambe abyssinica* Hochst). **IDESIA (Chile)**, v. 30, n. 3, p. 23-28, 2012. doi: 10.4067/S0718-34292012000300003.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique appliquée**, v. 1, 1962.

MEIJER, W. J. M.; MATHIJSSSEN, E. W. J. M.; KREUZER, A. D. Low pod numbers and inefficient use of radiation are major constraints to high productivity in *Crambe* crops. **Industrial Crops and Products**, v. 19, p. 221-233, 1999. PII: S0926-6690(98)00035-1.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Ciência Agrotécnica**, v. 32, n. 2, p. 532-539, 2008.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963-969, 2004. doi: 10.1590/S0103-84782004000300052.

MEYER, D.; DIMITRIADOU, E.; HORNIK, K.; WEINGESSEL, A.; LEISCH, F. **e1071: Misc Functions of the Department of Statistics (e1071)**, TU Wien. R package version 1.6-4. <http://CRAN.R-project.org/package=e1071>, 2014.

MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L.; SILVA, S. F.; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012. doi: 10.5433/1679-0359.2012v33n6p2057.

MYERS, D. Matrix formulation of co-kriging. **Mathematical Geology**, v. 14, n. 3, p. 249-257, 1982.

MYERS, D. Pseudo-cross variograms, Positive-definiteness, and Cokriging. **Mathematical Geology**, v. 23, n. 6, p. 805-816, 1991.

MZUKU, M.; KHOSLA, R.; REICH, R.; UBNAB, D.; SMITH, F.; MACDONALD, L. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Fertility & Plant Nutrition**, v. 69, p. 1572–1579, 2005. doi:10.2136/sssaj2005.0062.

NADEZHDINA, N.; PRAX, A.; CERMÁK, J.; NADEZHDIN, V.; ULRICH, R.; NERUDA, J.; SCHLAGHAMERSKY, A. Spruce roots under heavy machinery loading in two different soil types. **Forest Ecology and Management**, v. 282, p. 46-52, 2012. doi: 10.1016/j.foreco.2012.06.054.

NANNI, M. R.; POVH, F. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; CHICATI, M. L.; CEZAR, E. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 386-392, 2011. doi: 10.1590/S0103-90162011000300017.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 291-309, 2013. doi: 10.1007/s13593-011-0071-8.

NETO, J. V. N.; SANTOS, A. C. S.; GUARNIERI, A.; SOUZA, D. J. A. T.; DARONCH, D. J.; DOTTO, M. A.; ARAÚJO, A. S. Variabilidade especial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 193-204, 2014. doi: 10.5433/1679-0359.2014v35n1p193.

NEWELL-PRICE, J. P.; WHITTINGHAM, M. J.; CHAMBERS, B. J. & PEEL, S. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil & Tillage Research*, v. 127, p. 65-73, 2013. doi: 10.1016/j.still.2012.03.003.

ORJUELA-MATTA, H. M.; SANABRIA, Y. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Spatial analysis of infiltration in an Oxisol of the Eastern Plains of Colombia. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 72, n. 3, p. 404-410, 2012. doi: 10.4067/S0718-58392012000300015.

OZGOZ, E.; GUNAL, H.; ACIR, N.; GOKMEN, F.; BIROL, M.; BUDAK, M. Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a typic haplustoll. **Land Degradation Development**, v. 24, p. 277–286, 2013. doi: 10.1002/ldr.1126.

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, p. 683-691, 2004.

PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; TEIXEIRA, D. B.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1128-1135, 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000500002.

PITOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. **Tecnologia e produção: crambe**. 1. ed. Maracaju, Fundação MS, 2010. 60 p.

PREGNOLATTO, W.; PREGNOLATTO, N. P. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. São Paulo, 1985. 262p.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL, 2005. Disponível em: http://www.mda.gov.br/portal/saf/arquivos/view/biodiesel/arquivos-2011/Biodiesel_Book_final_Low_Completo.pdf Acesso em: 13 abr. 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2014. URL: <http://www.R-project.org/>.

RACZKOWSKI, C. W.; MUELLER, J. P.; BUSSCHER, W. J.; BELL, M. C.; McGRAW, M. L. Soil physical properties of agricultural systems in a large-scale study. **Soil & Tillage Research**, v. 119, p. 50-59, 2012. doi: 10.1016/j.still.2011.12.006.

REHMAN, S. U.; SHAPIRO, A. An integral transform approach to cross-variograms modeling. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 22, p. 213-233, 1996.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1547-1560, 2009a. doi: 10.1590/S0100-06832009000600004.

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, n. 4, p. 981-988, 2008. doi: 10.1590/S0103-84782008000400012.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, E. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORNB, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in

subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009b. doi: 10.1016/j.still.2008.07.002.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008. doi: 10.1590/S0100-06832008000500002.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1931-1935, 2006. doi: 10.1590/S0103-84782006000600044.

RODRIGUES, P. N. F.; ROLIM, M. M.; BEZERRA NETO, E.; PEDROSA, E. M. R.; OLIVEIRA, V. S. Crescimento e composição mineral do milho em função da compactação do solo e da aplicação de composto orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 94-99, 2009. doi: 10.1590/S1415-43662009000100014.

ROSA, H. A.; WAZILEWSKI, W. T.; SECCO, D.; CHAVES, L. I.; VELOSO, G.; SOUZA, S. N. M.; SILVA, M. J.; SANTOS, R. F. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil — A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 651-655, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.013.

ROWLINGSON, B.; DIGGLE, P. **splancs: Spatial and Space-Time Point Pattern Analysis**. R package version 2.01-36. 2014. <http://CRAN.R-project.org/package=splancs>.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F. Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. **Energy Policy**, v. 39, p. 1630-1646, 2011. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.039.

SCHLATHER, M.; MALINOWSKI, A.; MENCK, P. J.; OESTING, M.; STROKORB, K. Analysis, Simulation and Prediction of Multivariate Random Fields with Package Random Fields. **Journal of Statistical Software**. 2014.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 58-64, 2009. doi: 10.1590/S0103-84782009000100010.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004. doi:10.1590/S0103-84782004000200010.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 191-199, 2000.

SORDA, G.; BANSE, M.; KEMFERT, C. An overview of biofuel policies across the world. **Energy Policy**, v. 38, p. 6977-6988, 2010. doi:10.1016/j.enpol.2010.06.066.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 4, p. 589-596, 2008. doi: 0.4025/actasciagron.v30i4.5322.

SOUZA, V. Q.; NARDINO, M.; BONATO, G. O.; BAHRY, C. A.; CARON, B. O.; ZIMMER, D. S. Desfolha em diferentes estádios fenológicos sobre características agronômicas em trigo. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1905-1911, 2013.

SWAMEE, P. K.; RATHIE, P. N.; OZELIM, L. C. S. M. Explicit equations for infiltration. **Journal of Hydrology**, v. 426-427, p. 151-153, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.020.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre. Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico n. 5).

UMALI, B. P.; OLIVER, D. P.; FORRESTER, S.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; HUTSON, J. L.; KOOKANA, R. S.; OSTENDORF, B. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. **Catena**, v. 93, p. 38-48, 2012. doi:10.1016/j.catena.2012.01.010.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012. doi: 10.1590/S1415-43662012000900007.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0, 2002.

VIEIRA, M. D.; SECCO, D.; SANTOS, R. F.; SOUZA, S. N. M.; ROSA, H. A.; VELOSO, G.; DALPOSSO, G. H.; NAVA, D. N. Spatial variability of physical attributes of a clayey latosol related to the grain yield of the crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) culture. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 38, p. 5357-5362, 2012a. doi: 10.5897/AJAR11.1439.

VIEIRA, M. D.; SECCO, D.; VICENTE, A.; SANTOS, R. F.; ROSA, H. A.; VELOSO, G.; DALPOSSO, G. H.; NAVA, D. T. Spatial variability of chemical attributes on clayey Latosol related to crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) grain yield. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 10, n. 3-4, p. 1464-1467, 2012b.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. **GIS Brasil**, v. 98, 2000.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durchErnteverfahren**. Schriftenreihe (Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde) - Christian Albrechts Universität Kiel, Kiel, 2004.

WACKERNAGEL, H. Geostatistical techniques for interpreting multivariate spatial information, in Chung, C. F.; Fabbri, A. G.; Sinding-Larsen, R. **Quantitative analysis of mineral and energy resources: Reidel**, p. 393-409, 1988.

WANG, Y. Q.; SHAO, M. A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the loess plateau of PR China subject to wind and water erosion. **Land Degradation Development**, v. 24. p. 296-304, 2013. doi: 10.1002/ldr.1128.

WAZILEWSKI, W. T.; BARICCATTI, R. A.; MARTINS, G. I.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 207-212, 2013. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.07.046.

WERNER, E. T.; LOPES, J. C.; GOMES JR., D.; LUBER, J.; AMARAL, J. A. T. Accelerated aging test to evaluate the quality of crambe (*Crambe abyssinica* Hochst – Brassicaceae) seed physiology. **IDESIA(Chile)**, v. 31, n. 1., p. 35-43, 2013. doi: 10.4067/S0718-34292013000100005.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; ZHANG, T. J.; GAO, P.; WANG, X. P.; HONG, L. Z.; WANG, M. W. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. **Geoderma**, v. 232-234, p. 381-393, 2014. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.06.006.

ZHANG, S.; GRIP, H.; LÖVDAHL, L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil & Tillage Research**, v. 90, p. 117-125, 2006. doi: 10.1016/j.still.2005.08.012.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance. **Journal of Hydrology**, v. 361, p. 78-95, 2008. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.027.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

Crambe

Tabela 1 – Estatística descritiva do teor de óleo do crambe em 2012 e do rendimento de grãos em 2012 e 2013

Estatística	Teor de Óleo do Crambe 2012	Rendimento do Crambe 2012	Rendimento do Crambe 2013
Média	29,32	1,90	1,10
Mínimo	18,62	0,83	1,04
Q1	26,35	1,60	1,06
Mediana	29,31	1,80	1,08
Q3	32,04	2,17	1,13
Máximo	42,03	3,21	1,30
S	4,03	0,47	0,054
S ²	16,26	0,22	0,003
CV	13,74	24,74	4,91
Assimetria	0,09	0,63	1,34
Curtose	3,04	3,46	4,22
<i>p-valor*</i>	0,98	0,0009	2,4x10 ⁻¹⁰

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

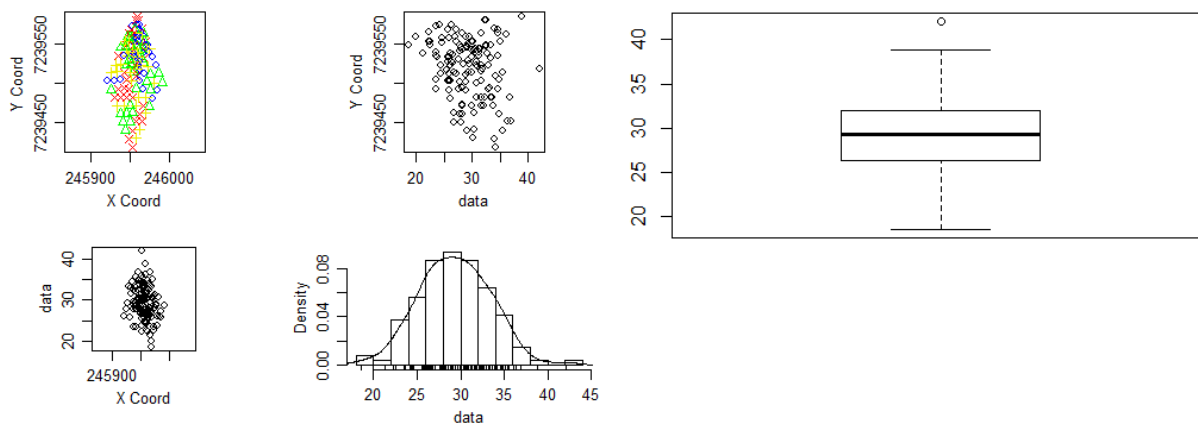


Figura 1 – Gráficos descritivos do Teor de Óleo do Crambe em 2012.

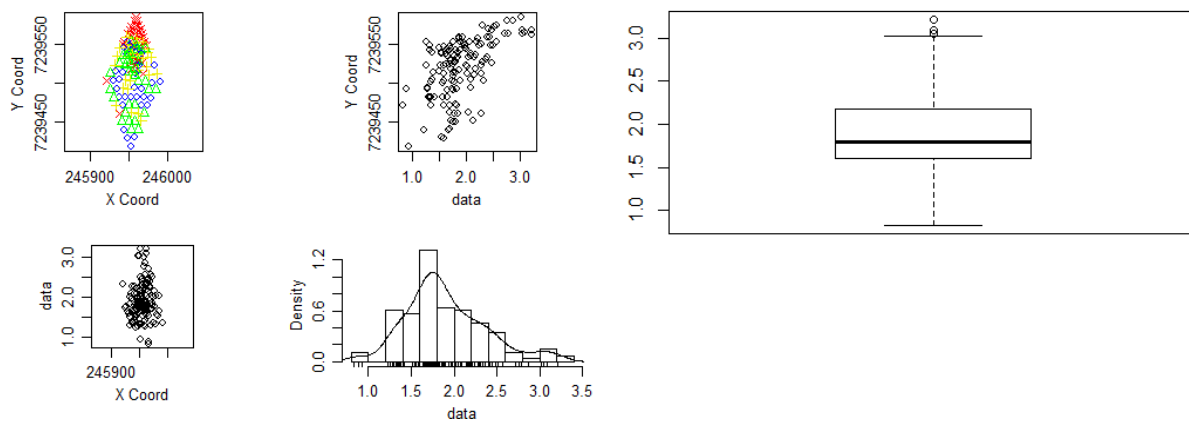


Figura 2 – Gráficos descritivos do Rendimento de Grãos do Crambe em 2012.

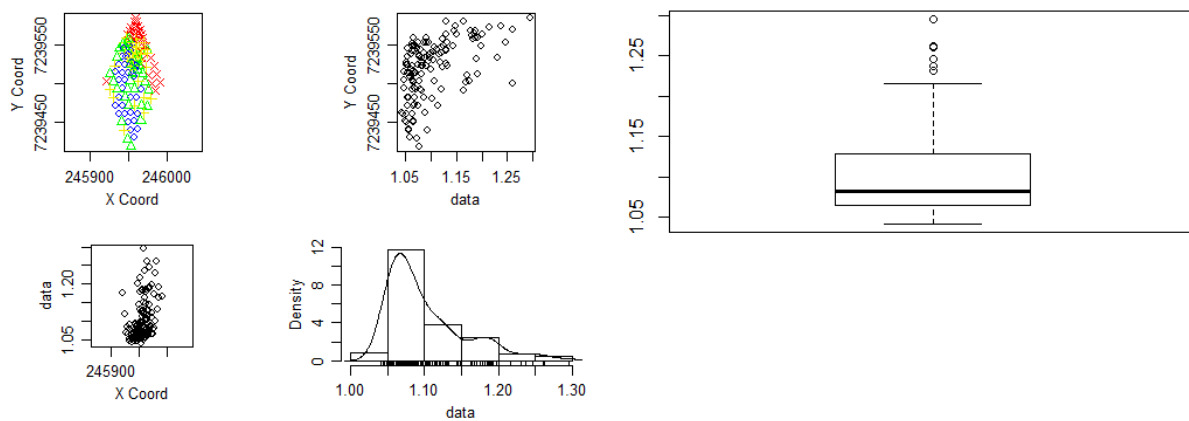


Figura 3 – Gráficos descritivos do Rendimento de Grãos do Crambe em 2013.

Densidade do Solo

Tabela 2 – Estatística descritiva da densidade do solo (Ds) nas camadas de 0,0-0,1m (1), 0,1-0,2m (2) e 0,2-0,3m (3) nas coletas de Fev/2012 (a), Ago/2012 (b) e Out/2013 (c)

Estatística	Ds1a	Ds1b	Ds1c	Ds2a	Ds2b	Ds2c	Ds3a	Ds3b	Ds3c
Média	1,07	1,07	1,11	1,10	1,12	1,18	1,06	1,10	1,14
Mínimo	0,91	0,91	0,82	0,94	0,60	0,95	0,93	0,96	0,96
Q1	1,02	1,03	1,06	1,07	1,08	1,13	1,01	1,05	1,09
Mediana	1,09	1,07	1,10	1,09	1,12	1,17	1,04	1,10	1,12
Q3	1,12	1,11	1,15	1,13	1,16	1,21	1,10	1,14	1,16
Máximo	1,20	1,25	1,49	1,40	1,41	1,50	1,23	1,26	1,52
S	0,06	0,06	0,10	0,059	0,072	0,07	0,06	0,06	0,08
S ²	0,004	0,004	0,01	0,004	0,005	0,006	0,004	0,004	0,007
CV	5,61	5,61	9,01	5,36	6,43	5,93	5,66	5,45	7,32
Assimetria	-0,32	-0,12	0,42	1,28	-2,23	1,22	0,54	0,03	1,77
Curtose	2,43	3,18	4,42	7,67	22,41	7,15	2,64	2,80	8,62
<i>p</i> -valor*	0,07	0,67	0,008	2×10^{-6}	3×10^{-12}	$3,2 \times 10^{-8}$	0,002	0,62	$1,2 \times 10^{-9}$

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

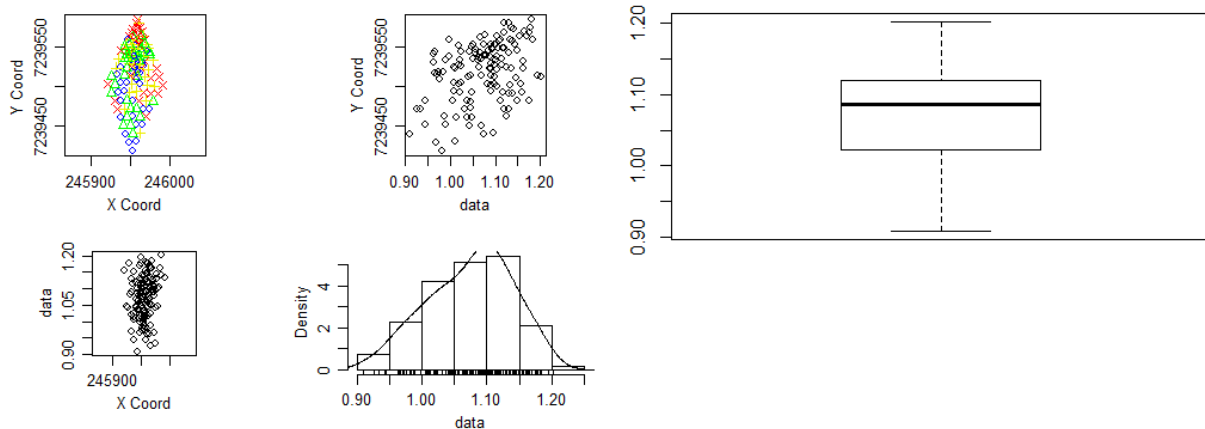


Figura 4 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,0-0,1 m em Fev/2012.

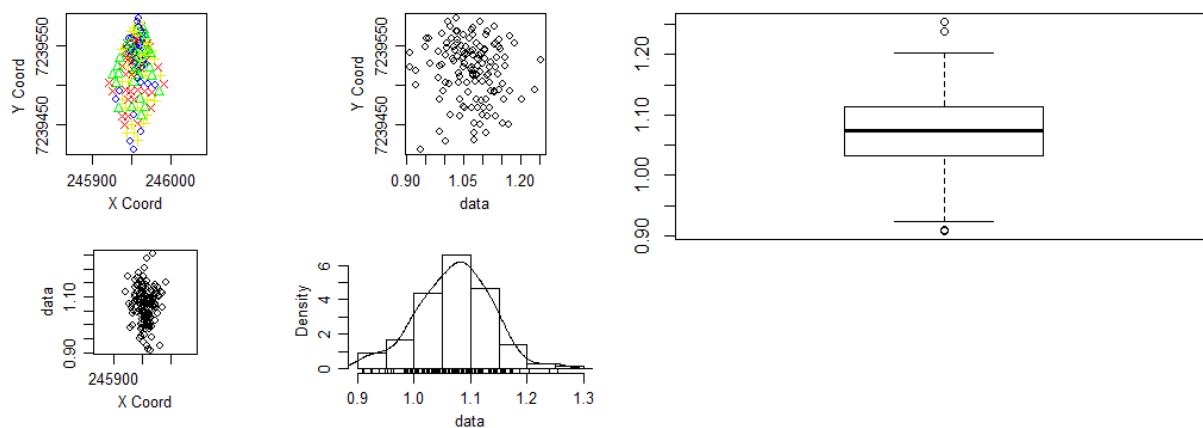


Figura 5 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,0-0,1 m em Ago/2012.

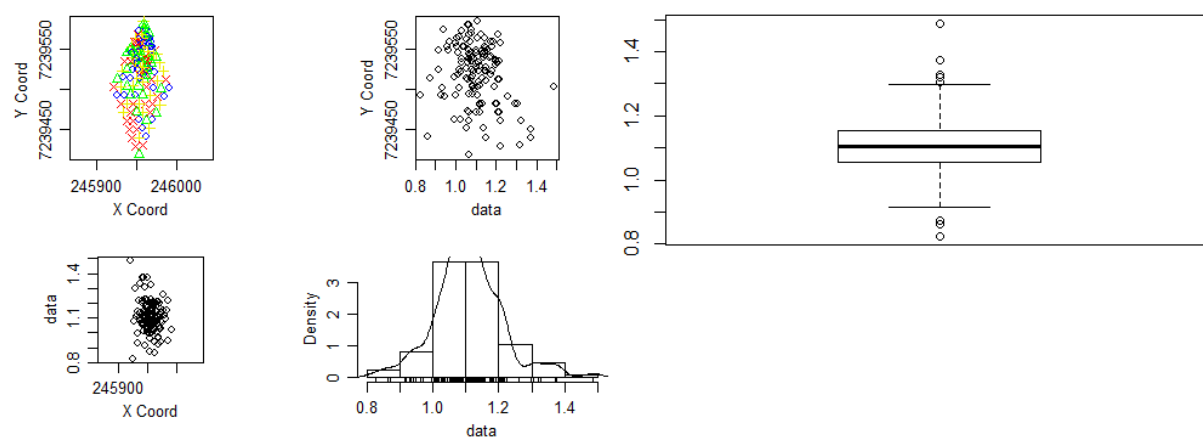


Figura 6 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,0-0,1 m em Out/2013.

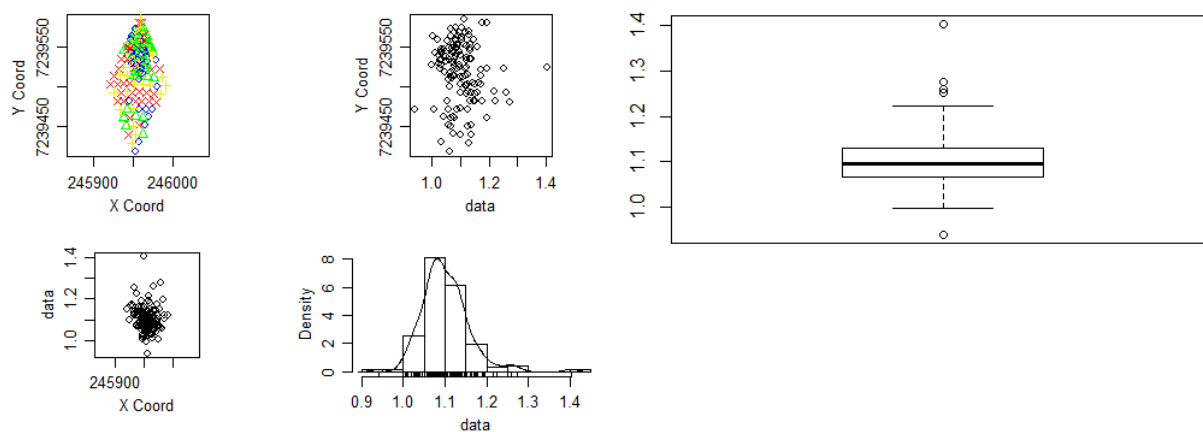


Figura 7 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,1-0,2 m em Fev/2012.

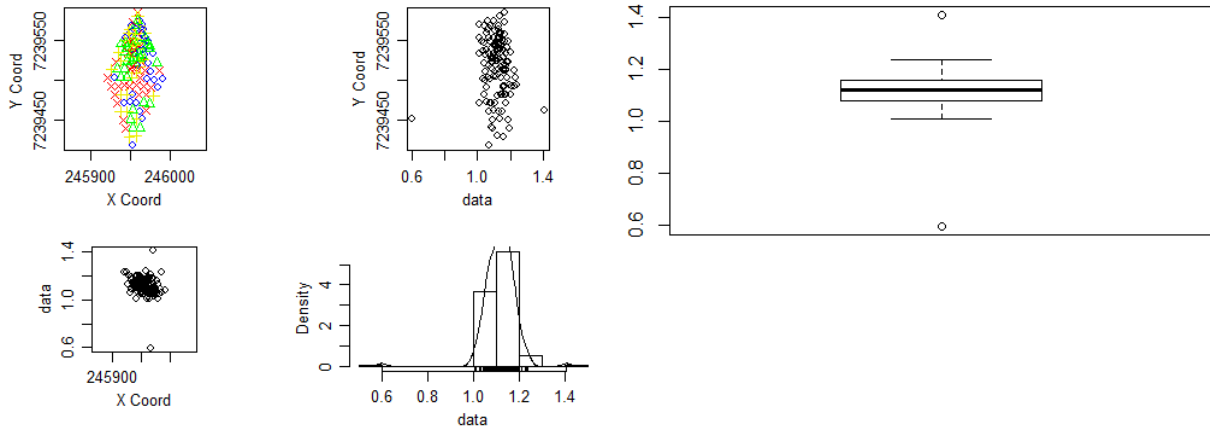


Figura 8 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,1-0,2 m em Ago/2012.

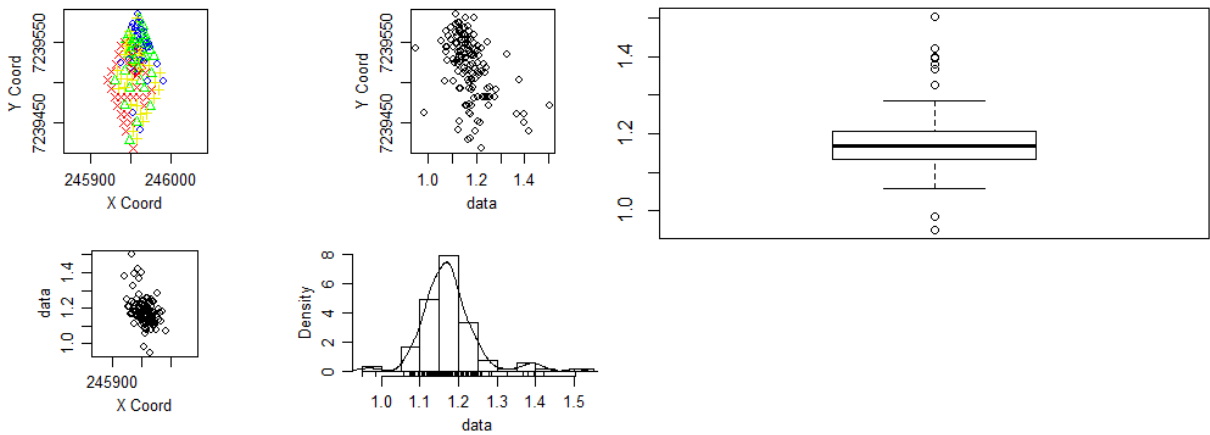


Figura 9 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,1-0,2 m em Out/2013.

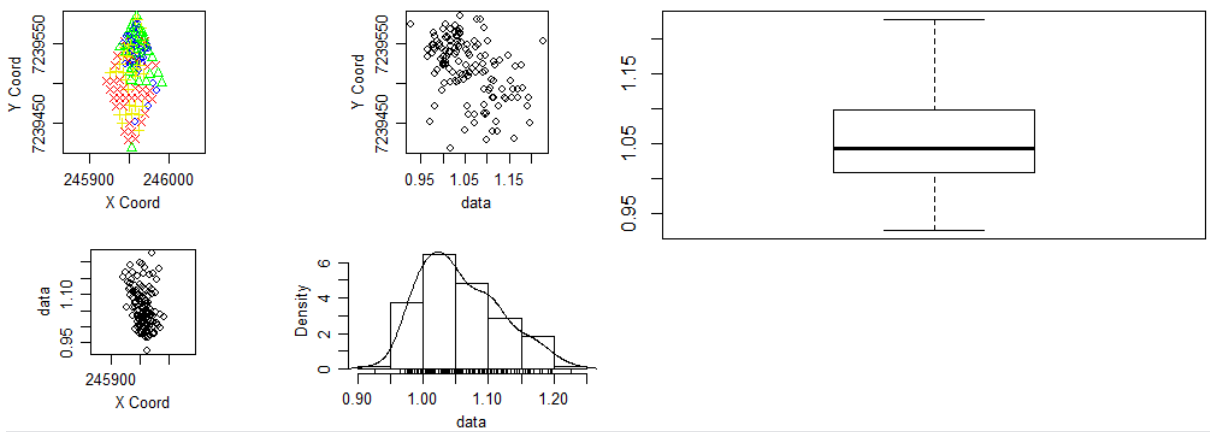


Figura 10 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,2-0,3 m em Fev/2012.

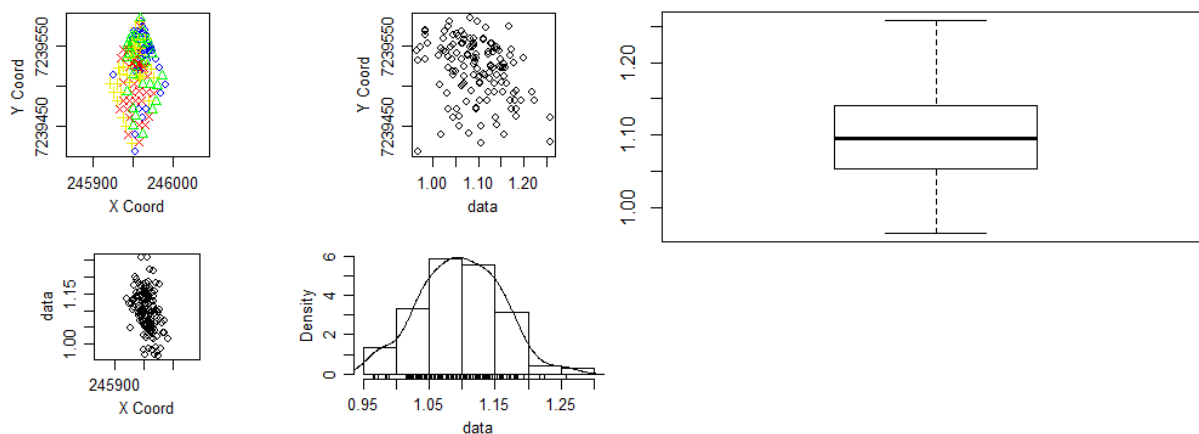


Figura 11 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,2-0,3 m em Ago/2012.

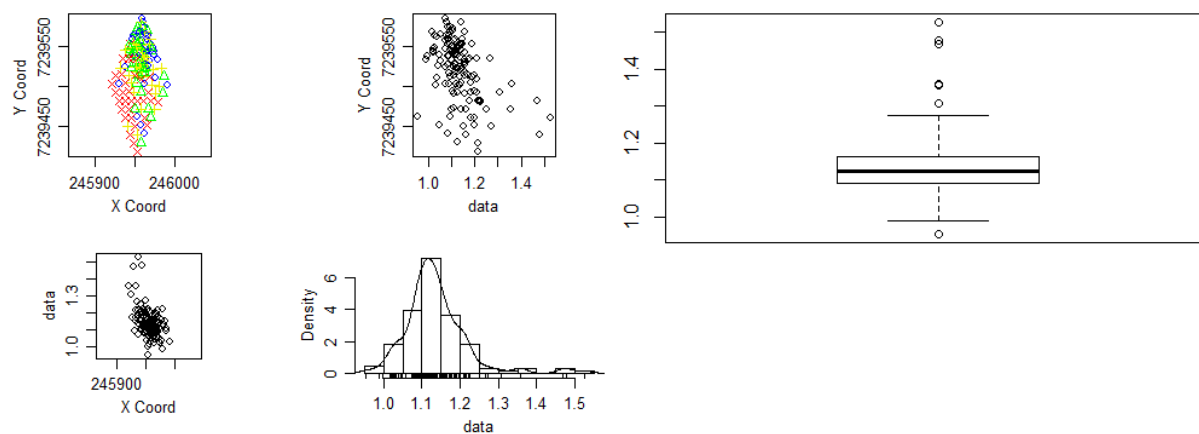


Figura 12 – Gráficos descritivos da Ds na camada de 0,2-0,3 m em Out/2013.

Macroporosidade

Tabela 3 – Estatística descritiva da macroporosidade (Ma) nas camadas de 0,0-0,1m (1), 0,1-0,2m (2) e 0,2-0,3m (3) nas coletas de Fev/2012 (a), Ago/2012 (b) e Out/2013 (c)

Estatística	Ma1a	Ma1b	Ma1c	Ma2a	Ma2b	Ma2c	Ma3a	Ma3b	Ma3c
Média	14,28	13,92	13,41	17,28	17,75	11,05	16,73	17,06	11,10
Mínimo	9,16	1,58	4,59	4,25	6,28	5,38	11,43	10,25	4,23
Q1	12,31	12,22	9,33	16,08	16,62	9,08	15,14	15,52	8,77
Mediana	14,21	13,89	12,34	17,38	17,85	10,42	16,71	16,72	10,44
Q3	16,16	15,50	17,09	18,40	19,04	12,46	18,07	18,45	12,89
Máximo	21,40	26,04	36,75	24,99	23,23	26,54	26,01	23,91	27,78
S	2,62	3,03	5,79	2,36	2,22	10,50	2,46	2,32	3,51
S ²	6,86	9,18	33,48	5,57	4,91	3,24	6,05	5,37	12,34
CV	18,35	21,77	43,18	13,66	12,51	95,02	14,70	13,60	31,62
Assimetria	0,19	0,36	1,11	-0,90	-0,89	1,78	0,65	0,25	1,27
Curtose	2,49	6,67	4,60	9,70	7,33	9,11	4,42	3,17	6,19
<i>p</i> -valor*	0,27	1,6x10 ⁻⁵	2,8x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁷	6x10 ⁻⁷	6,2x10 ⁻⁹	0,005	0,48	1,9x10 ⁻⁶

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

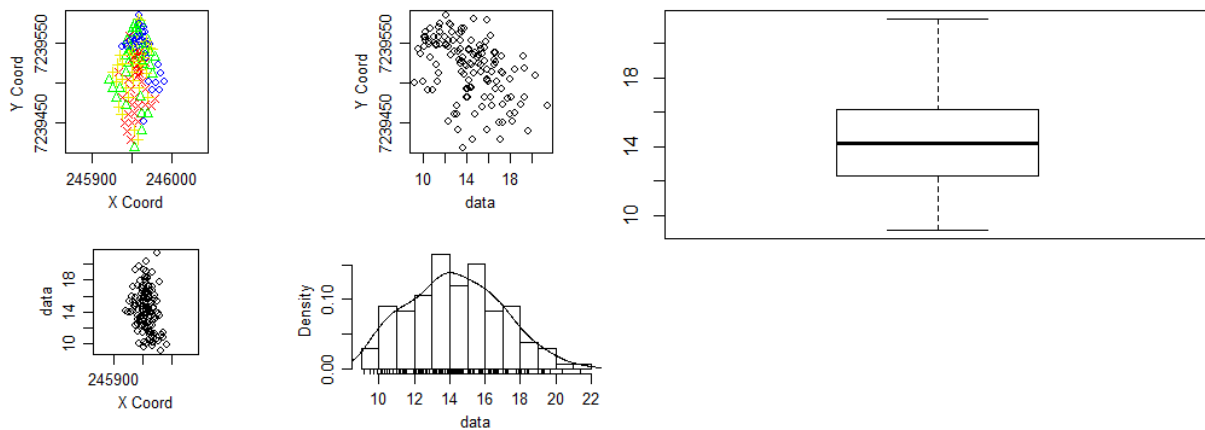


Figura 13 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,0-0,1m em Fev/2012.

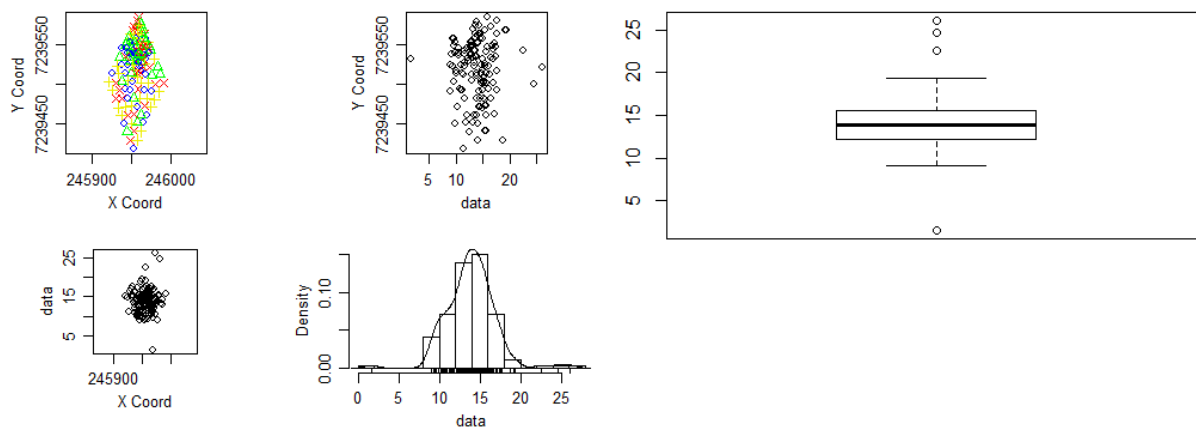


Figura 14 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,0-0,1m em Ago/2012.

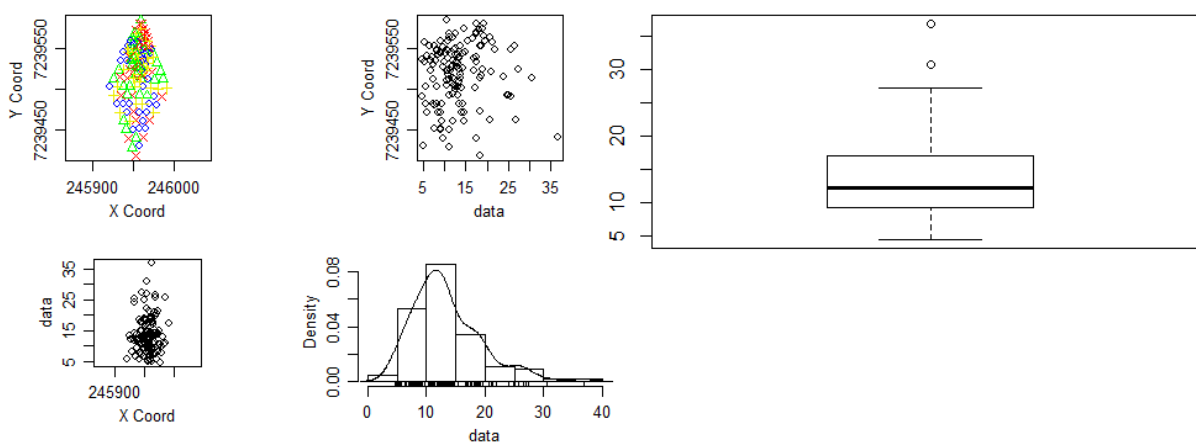


Figura 15 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,0-0,1m em Out/2013.

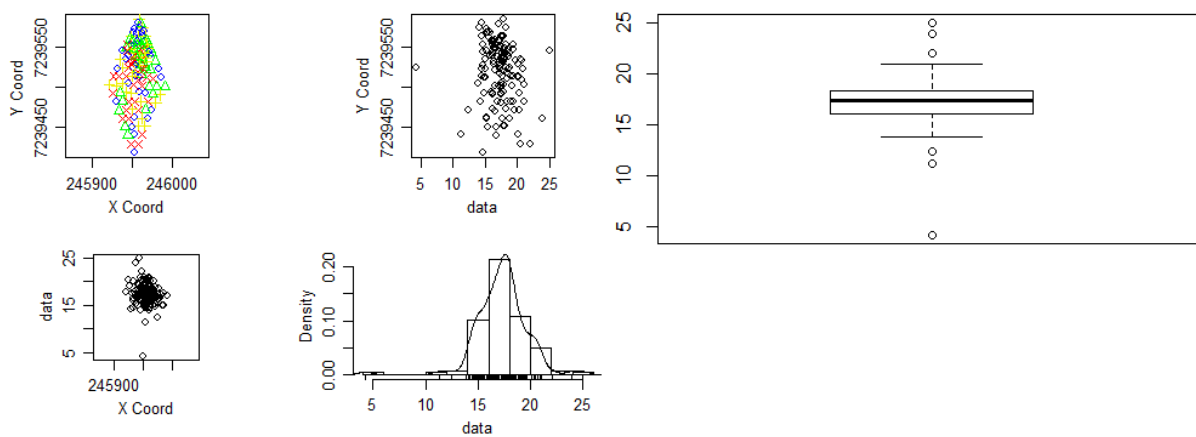


Figura 16 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Fev/2012.

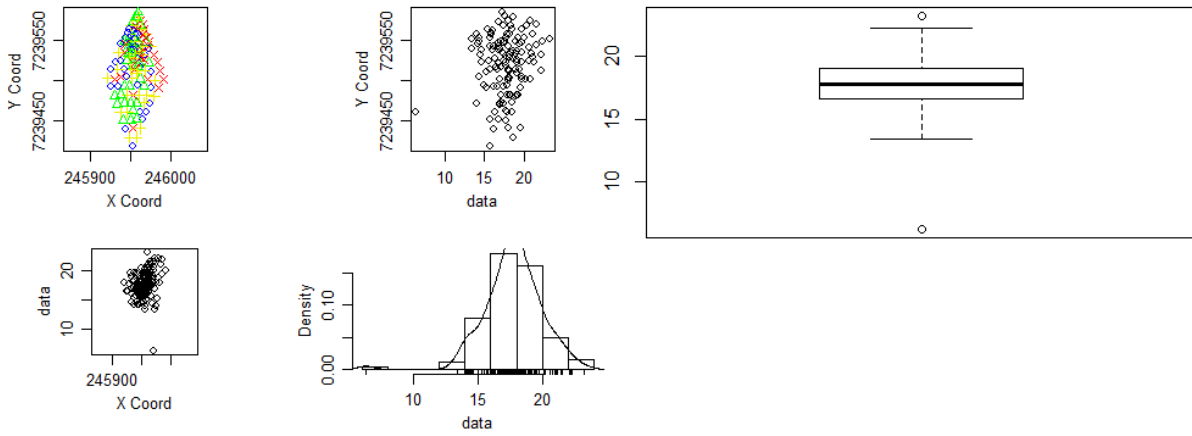


Figura 17 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Ago/2012.

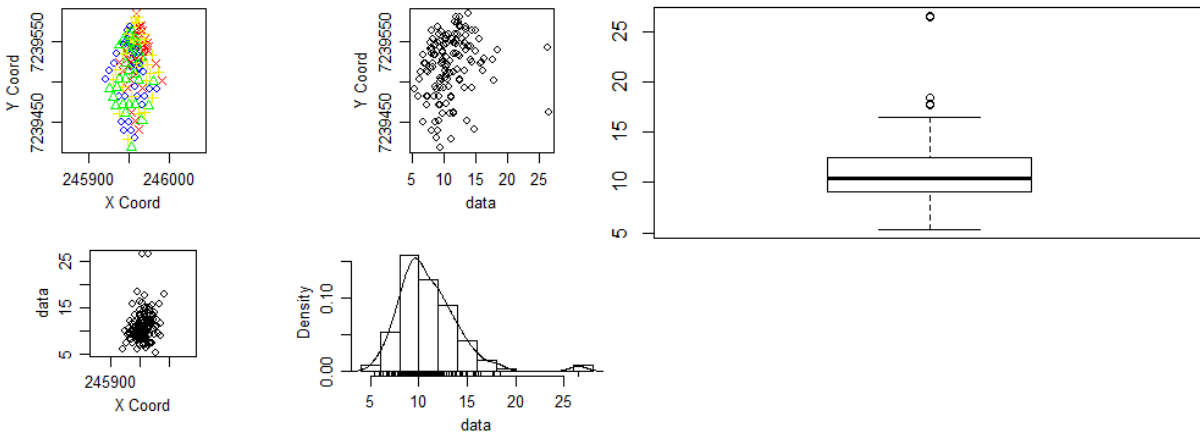


Figura 18 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Out/2013.

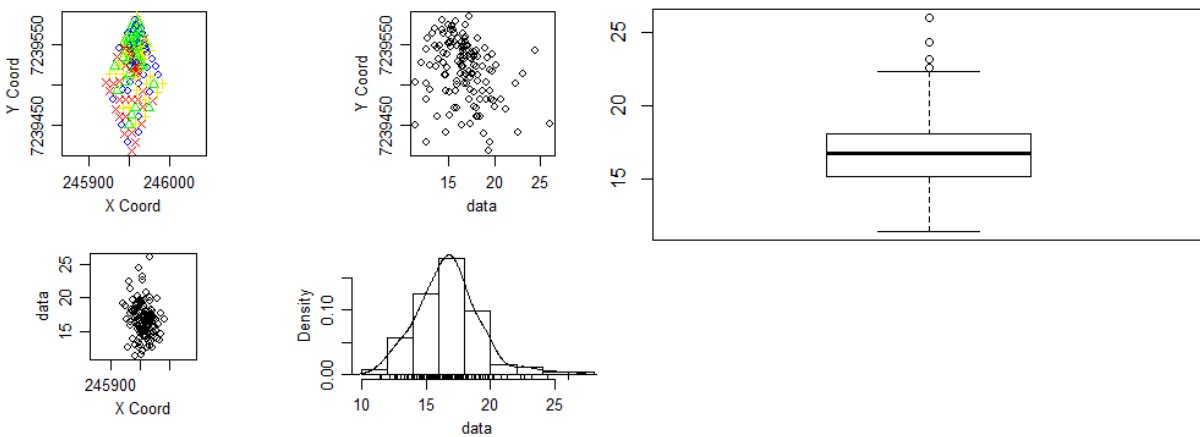


Figura 19 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Fev/2012.

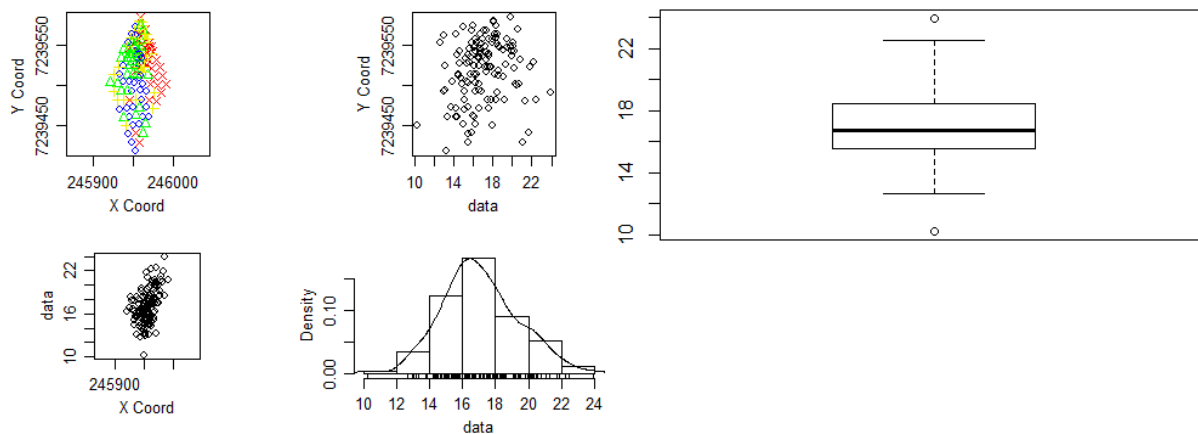


Figura 20 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Ago/2012.

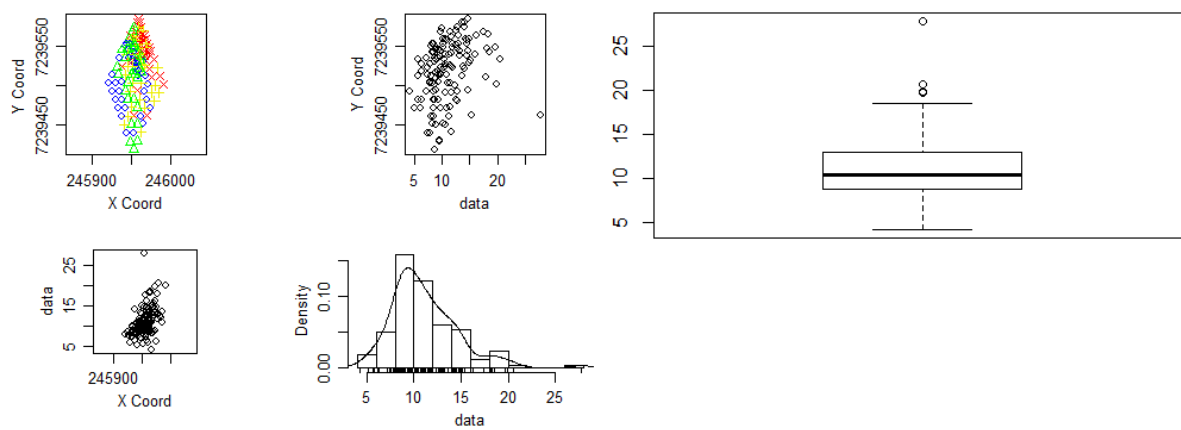


Figura 21 – Gráficos descritivos da macroporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Out/2013.

Microporosidade

Tabela 4 – Estatística descritiva da microporosidade (Mi) nas camadas de 0,0-0,1m (1), 0,1-0,2m (2) e 0,2-0,3m (3) nas coletas de Fev/2012 (a), Ago/2012 (b) e Out/2013 (c)

Estatística	Mi1a	Mi1b	Mi1c	Mi2a	Mi2b	Mi2c	Mi3a	Mi3b	Mi3c
Média	43,77	44,26	41,73	41,55	40,14	38,34	44,18	42,31	40,96
Mínimo	37,46	32,21	32,07	32,47	19,70	30,44	32,44	32,38	32,19
Q1	42,11	42,13	40,06	39,82	38,77	37,16	42,06	40,88	39,74
Mediana	43,83	44,33	41,83	41,54	40,02	38,37	45,30	42,12	41,53
Q3	45,10	46,32	43,44	43,12	41,51	39,58	46,65	43,85	42,48
Máximo	49,25	52,05	49,51	51,80	46,24	43,52	50,46	51,01	46,52
S	2,19	3,17	2,98	2,73	2,89	4,20	3,62	2,56	1,63
S ²	4,79	10,03	8,90	7,45	8,36	2,05	13,08	6,56	2,65
CV	5,00	7,16	7,14	6,57	7,20	10,95	8,19	6,05	3,98
Assimetria	0,04	-0,43	-0,17	0,19	-2,51	0,08	-0,88	0,05	-0,97
Curtose	2,92	3,95	3,55	4,85	20,60	-0,36	3,27	5,13	4,13
<i>p-valor</i> *	0,71	0,08	0,49	0,02	1,2x10 ⁻¹¹	4,30	4x10 ⁻⁶	0,007	1,1x10 ⁻⁵

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

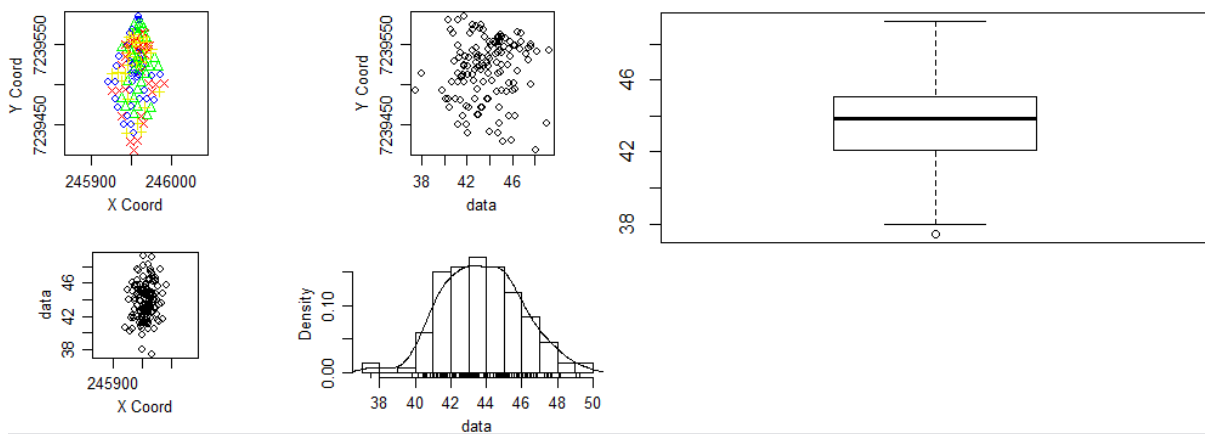


Figura 22 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,0-0,1m em Fev/2012.

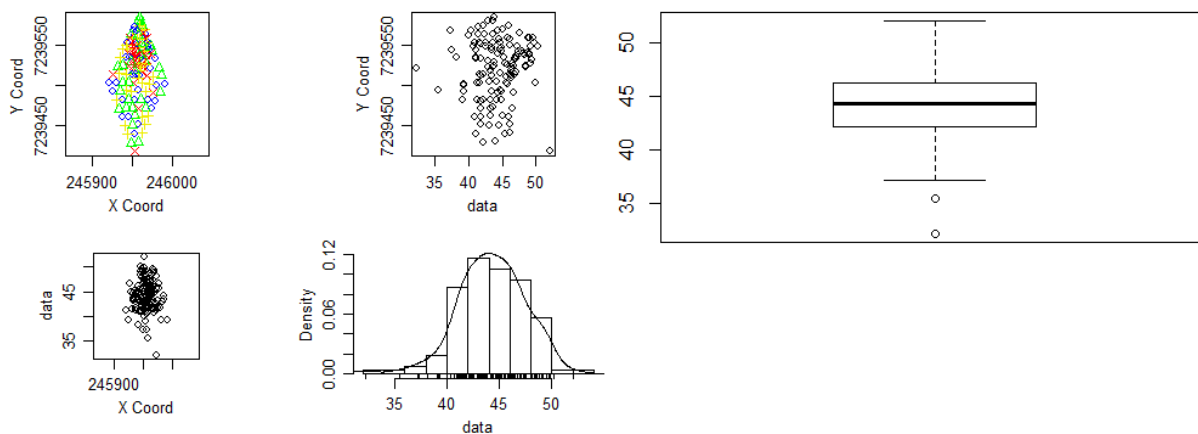


Figura 23 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,0-0,1m em Ago/2012.

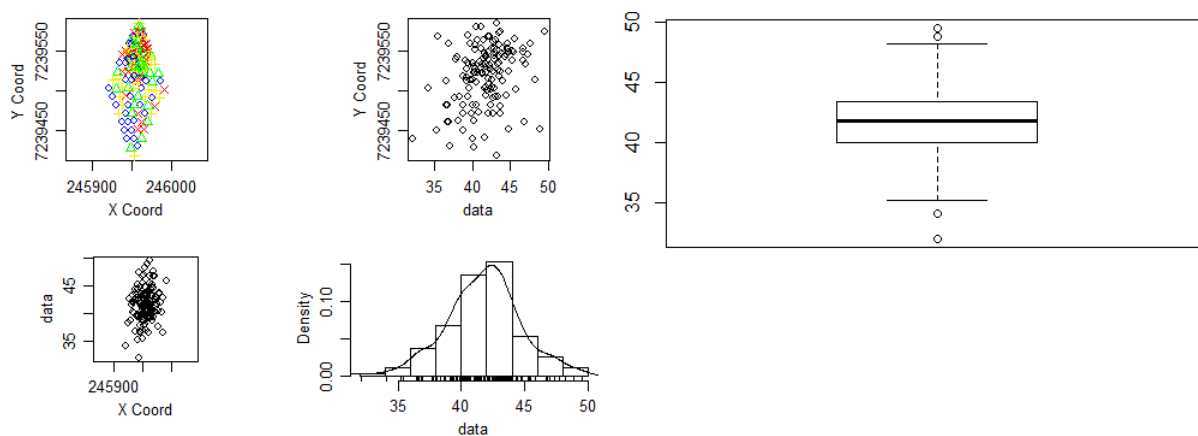


Figura 24 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,0-0,1m em Out/2013.

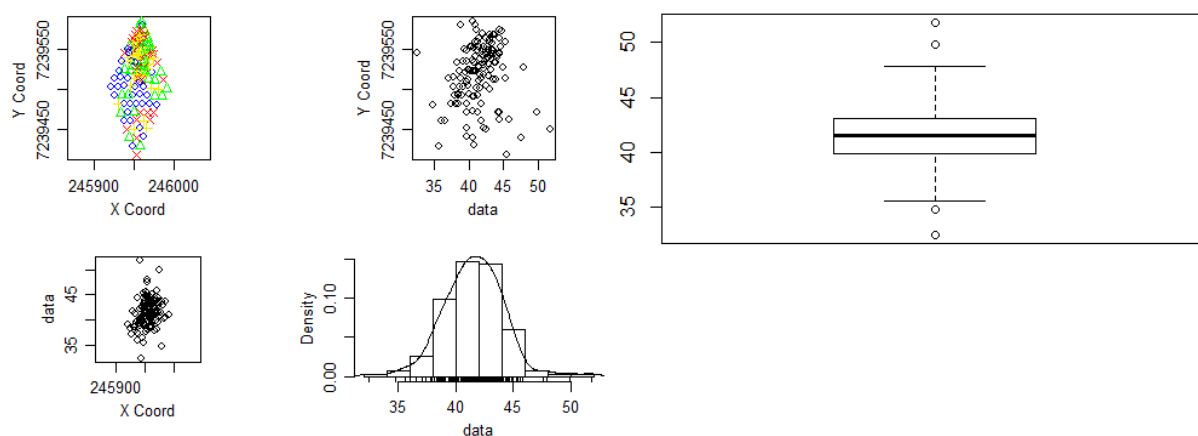


Figura 25 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Fev/2012.

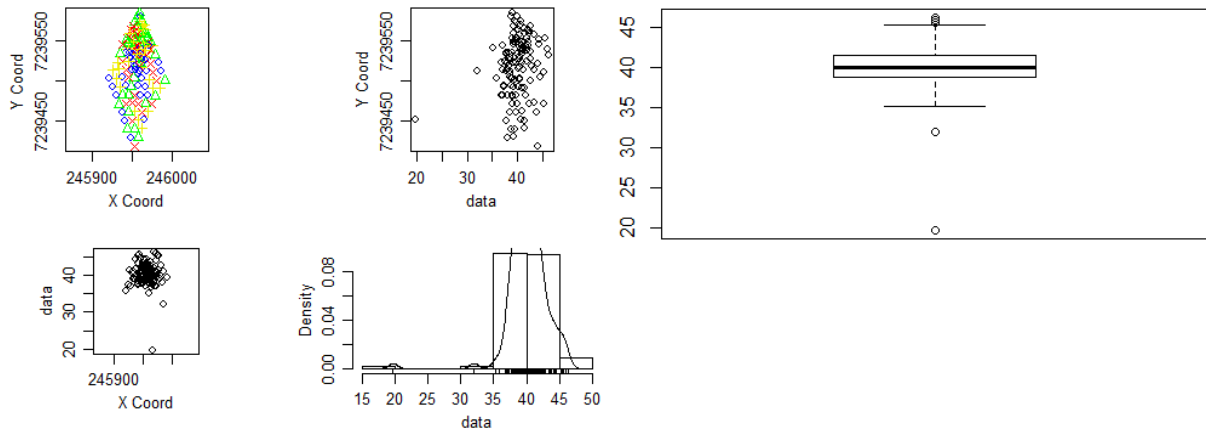


Figura 26 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Ago/2012.

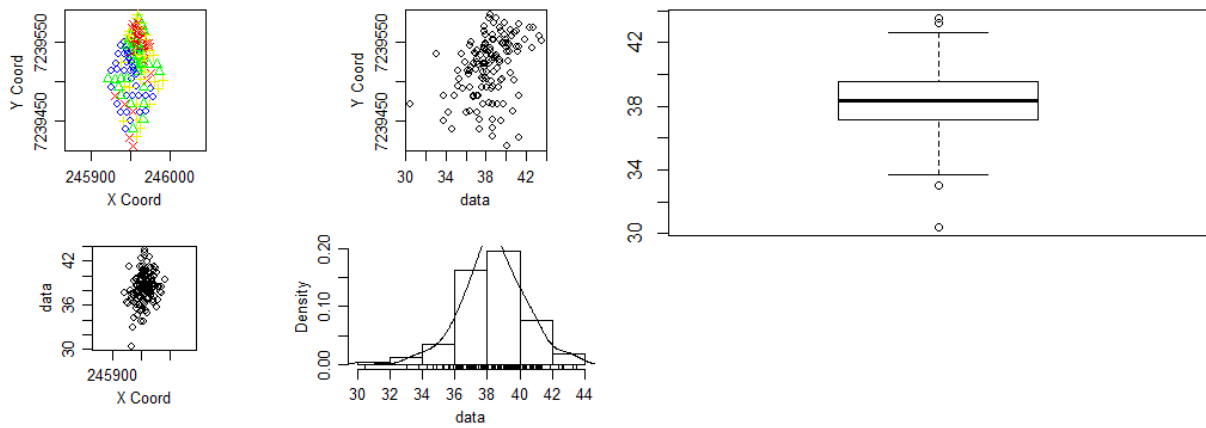


Figura 27 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,1-0,2 m em Out/2013.

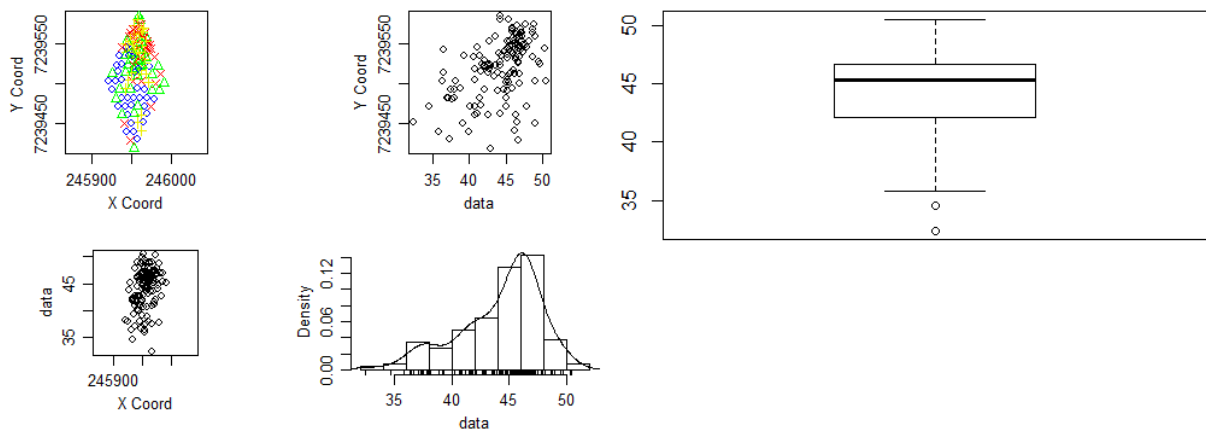


Figura 28 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Fev/2012.

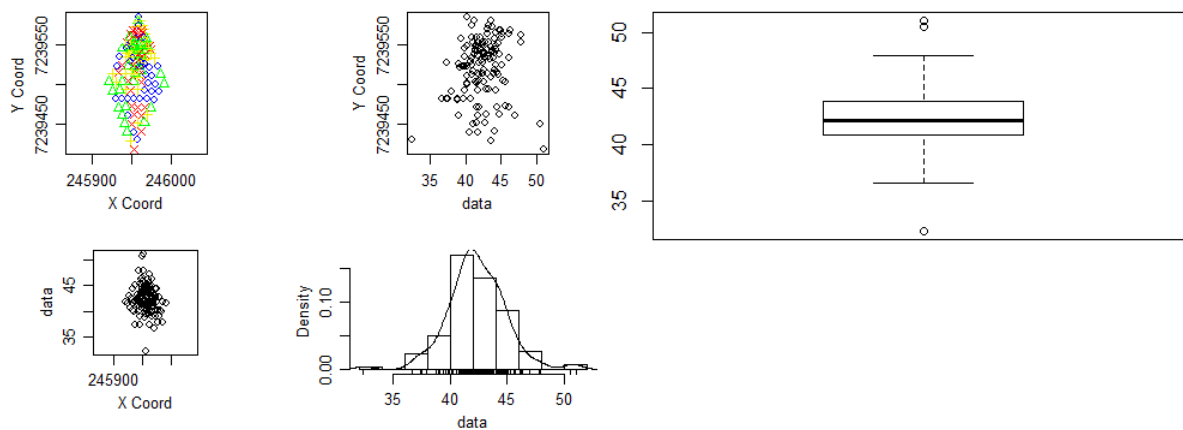


Figura 29 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Ago/2012.

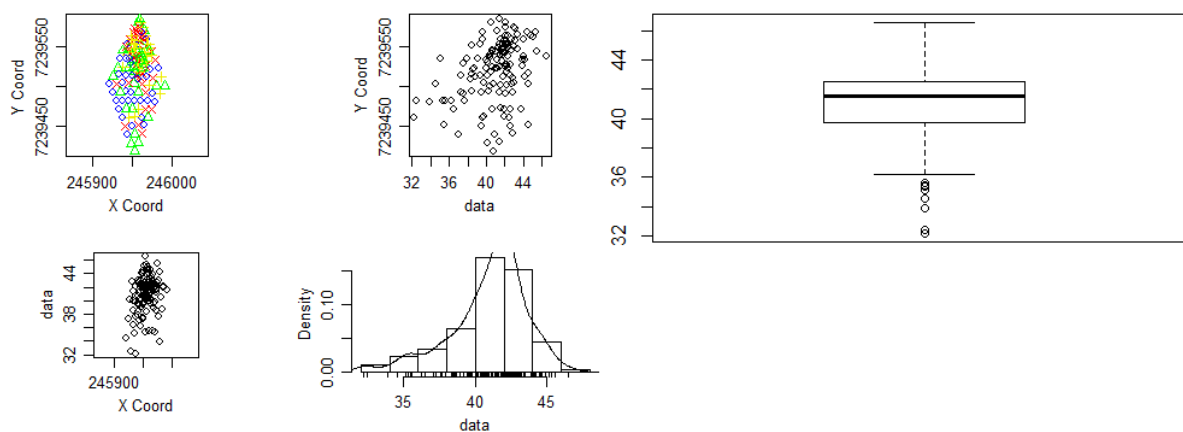


Figura 30 – Gráficos descritivos da microporosidade na camada de 0,2-0,3 m em Out/2013.

Porosidade Total

Tabela 5 – Estatística descritiva da porosidade total (PT) nas camadas de 0,0-0,1m (1), 0,1-0,2m (2) e 0,2-0,3m (3) nas coletas de Fev/2012 (a), Ago/2012 (b) e Out/2013 (c)

Estatística	PT1a	PT1b	PT1c	PT2a	PT2b	PT2c	PT3a	PT3b	PT3c
Média	58,05	58,18	55,14	58,74	58,04	49,38	60,92	59,37	52,60
Mínimo	53,05	51,02	39,70	47,47	47,29	39,67	55,67	53,40	38,25
Q1	56,25	56,53	50,12	57,64	56,68	46,54	59,37	57,78	48,83
Mediana	57,56	58,02	54,45	58,97	57,94	48,95	61,47	59,41	52,28
Q3	60,03	59,67	58,62	60,05	59,63	52,17	62,69	60,99	54,60
Máximo	64,49	64,52	78,83	64,78	62,24	69,03	65,68	64,27	69,80
S	2,54	2,52	50,35	2,22	2,14	4,34	2,20	2,25	2,22
S ²	6,48	6,35	7,10	4,95	4,57	18,85	4,83	5,08	4,94
CV	4,38	4,33	12,87	3,79	3,68	8,79	3,61	3,80	4,22
Assimetria	0,32	0,12	0,76	-1,27	-0,87	1,09	-0,49	-0,03	0,37
Curtose	2,43	3,18	3,89	7,67	6,50	6,72	2,49	2,80	3,99
<i>p-valor</i> *	0,07	0,67	0,002	2x10 ⁻⁶	1,2x10 ⁻⁵	8x10 ⁻⁶	0,001	0,62	0,08

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

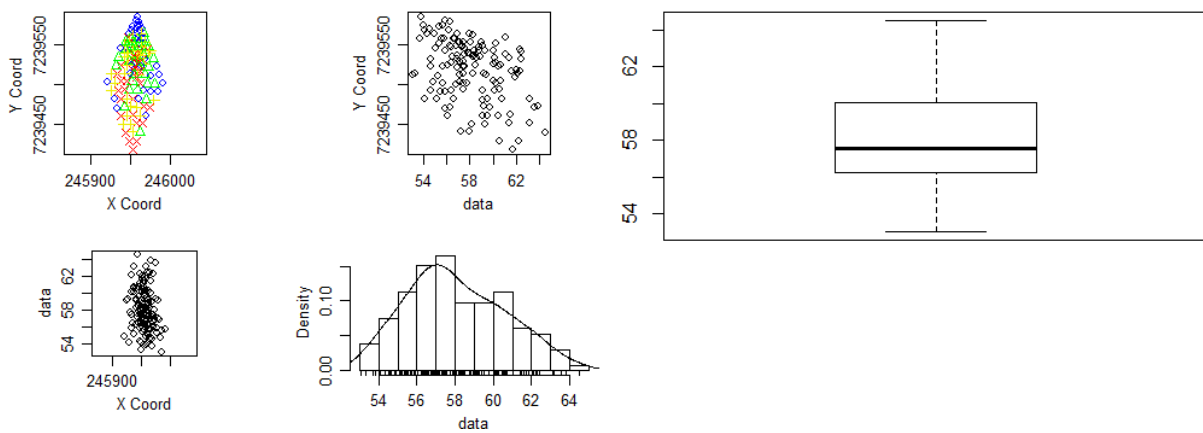


Figura 31 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,0-0,1m em Fev/2012.

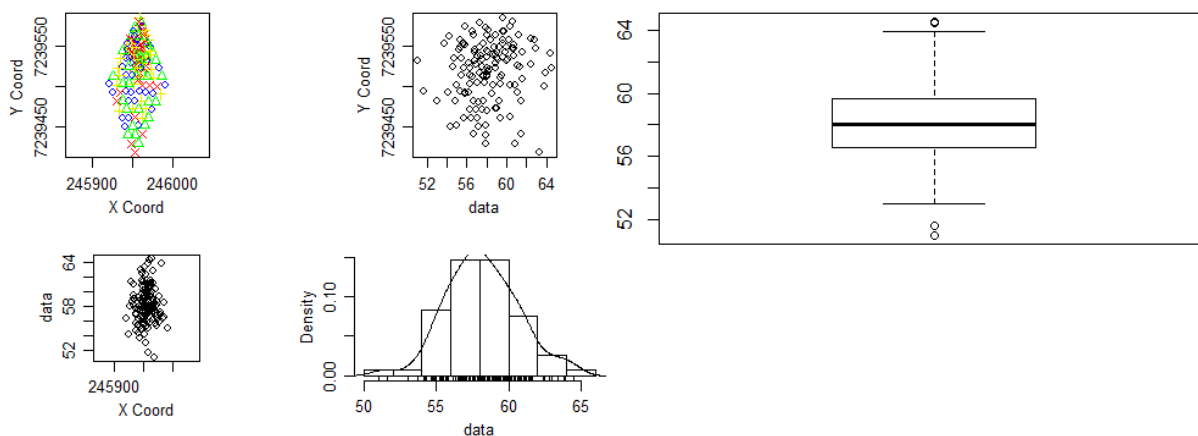


Figura 32 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,0-0,1m em Ago/2012.

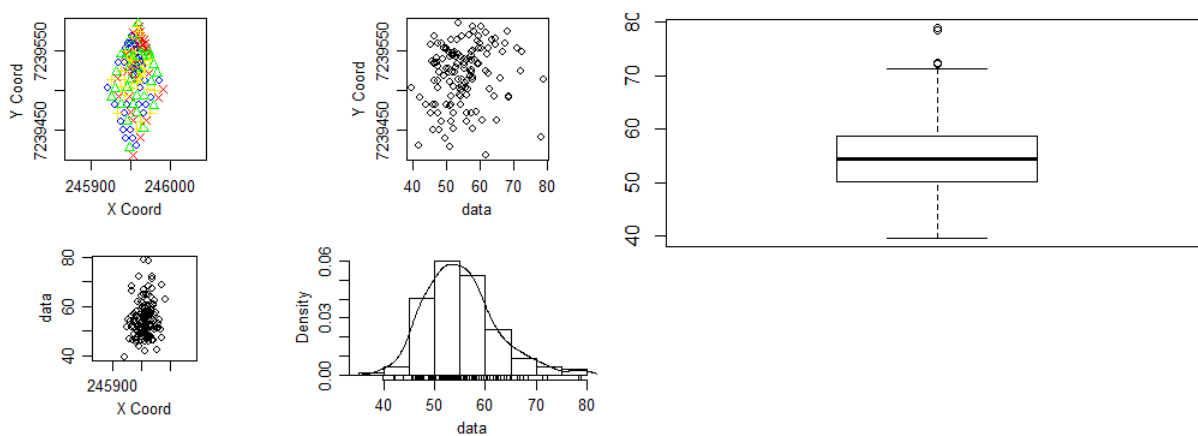


Figura 33 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,0-0,1m em Out/2013.

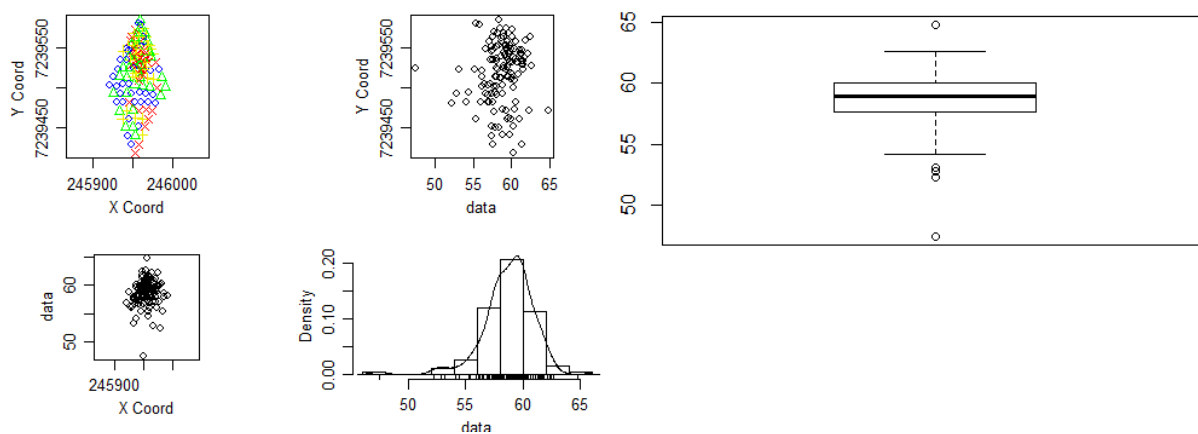


Figura 34 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,1-0,2 m em Fev/2012.

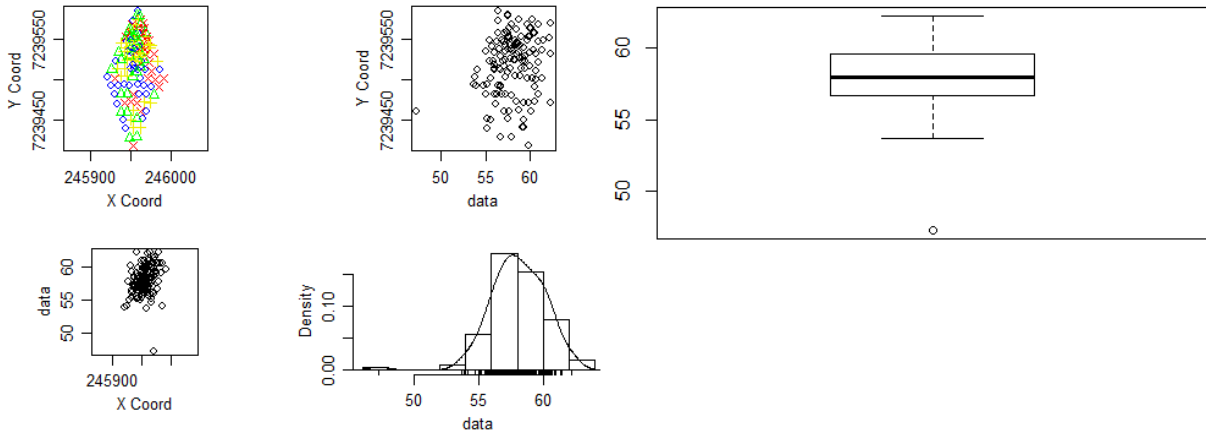


Figura 35 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,1-0,2 m em Ago/2012.

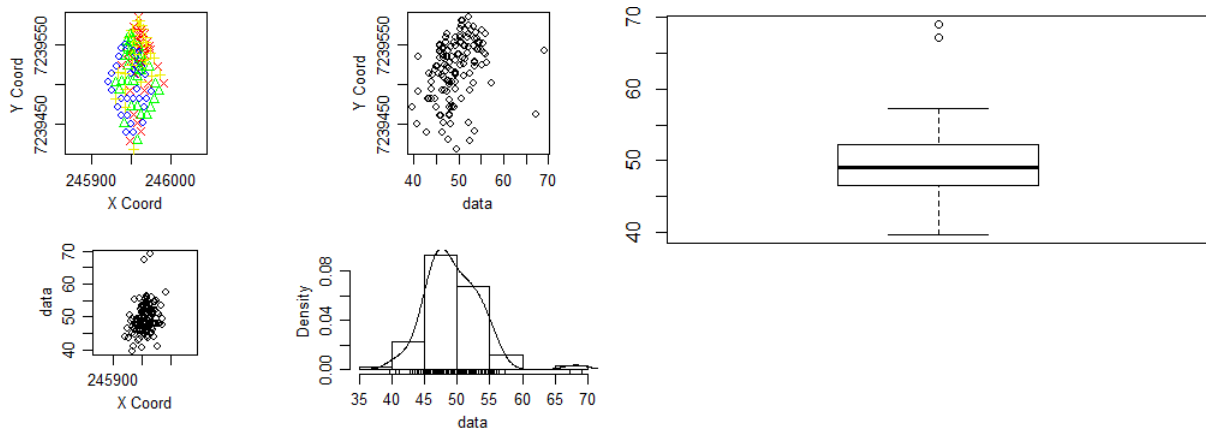


Figura 36 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,1-0,2 m em Out/2013.

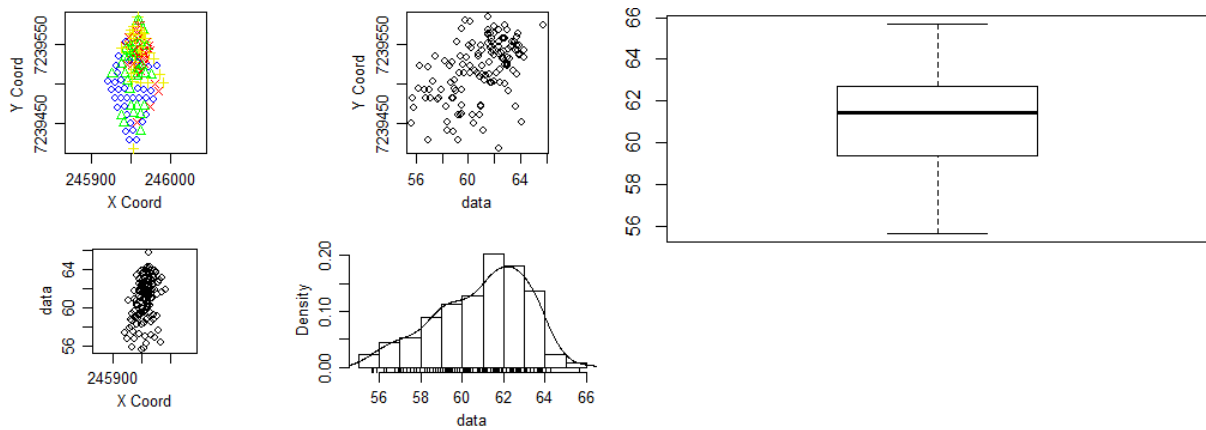


Figura 37 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,2-0,3 m em Fev/2012.

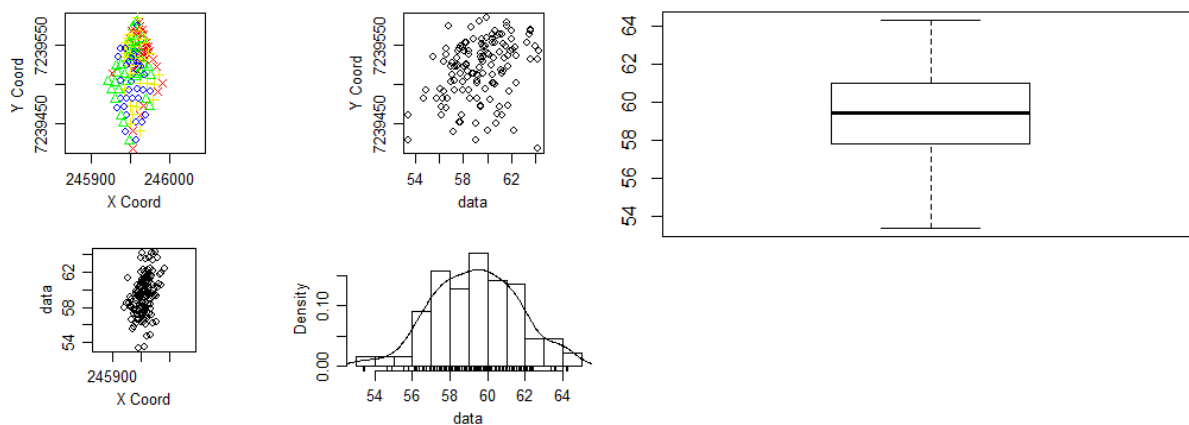


Figura 38 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,2-0,3 m em Ago/2012.

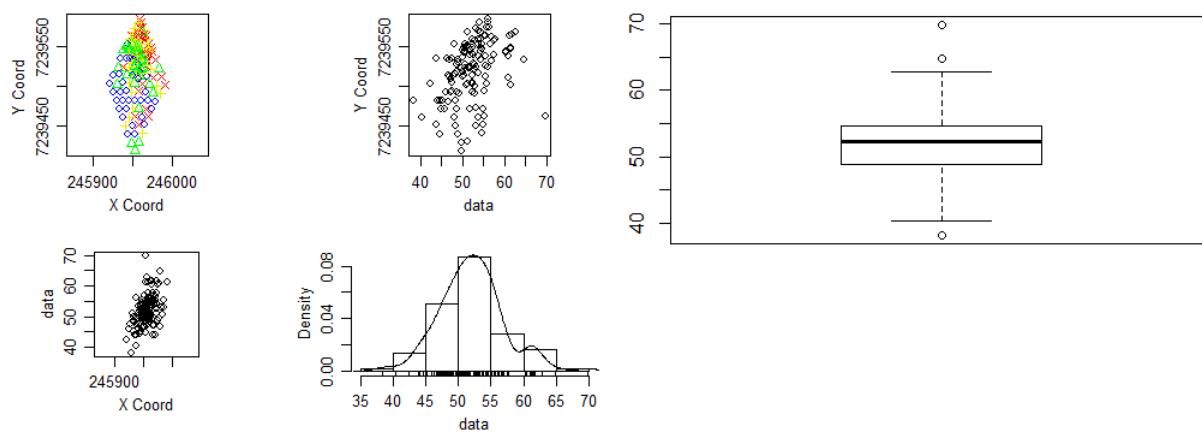


Figura 39 – Gráficos descritivos da PT na camada de 0,2-0,3 m em Out/2013.

Resistência do Solo à Penetração

Tabela 6 – Estatística descritiva da resistência do solo à penetração (Rp) nas camadas de 0,0-0,1m (1), 0,1-0,2m (2) e 0,2-0,3m (3) nas coletas de Fev/2012 (a), Ago/2012 (b) e Out/2013 (c)

Estatística	Rp1a	Rp1p	Rp2a	Rp2p	Rp3a	Rp3p
Média	2,08	2,90	2,65	4,30	2,12	3,72
Mínimo	0,86	1,19	1,63	2,85	1,57	2,55
Q1	1,69	2,52	2,37	3,97	1,94	3,33
Mediana	2,05	2,88	2,60	4,29	2,04	3,59
Q3	2,37	3,28	2,91	4,63	2,18	3,99
Máximo	3,89	4,04	4,81	6,49	3,43	6,25
S	0,56	0,55	0,46	0,59	0,32	0,60
S ²	0,31	0,30	0,21	0,34	0,10	0,36
CV	26,92	18,97	17,36	13,72	15,09	16,13
Assimetria	0,49	-0,24	1,02	0,46	1,83	1,47
Curtose	3,54	2,98	6,24	4,50	6,53	5,56
<i>p-valor*</i>	0,06	0,48	3,5x10 ⁻⁵	0,02	1x10 ⁻¹¹	5x10 ⁻⁹

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

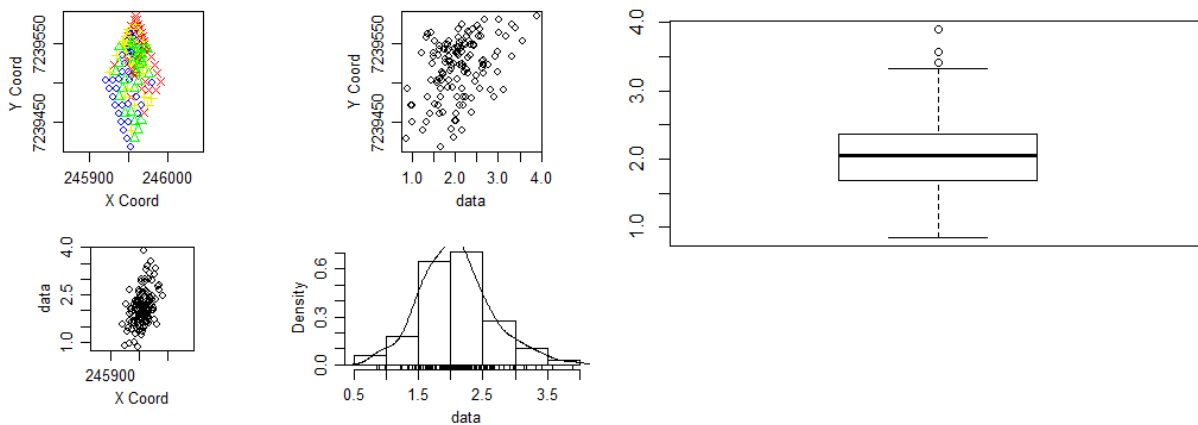


Figura 40 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,0-0,1m em Fev/2012.

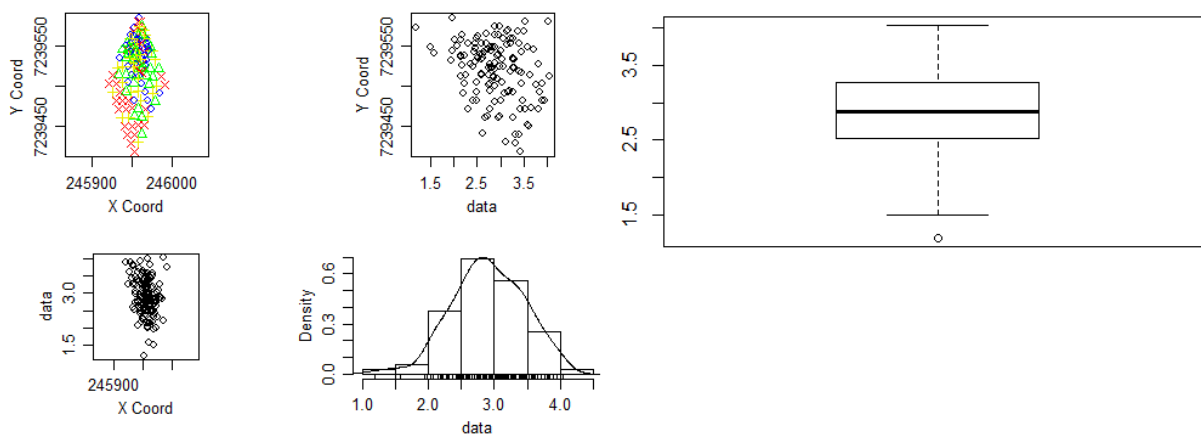


Figura 41 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,0-0,1m em Out/2013.

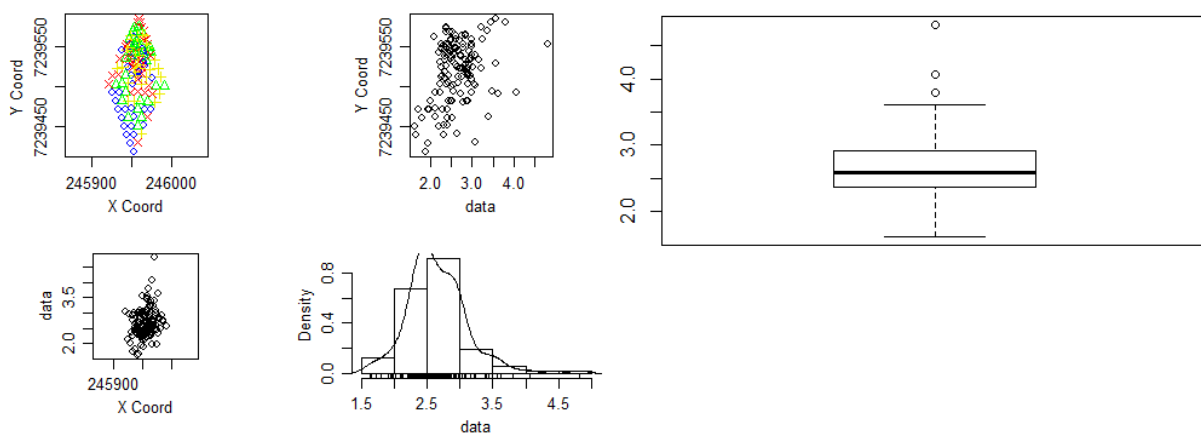


Figura 42 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,1-0,2 m em Fev/2012.

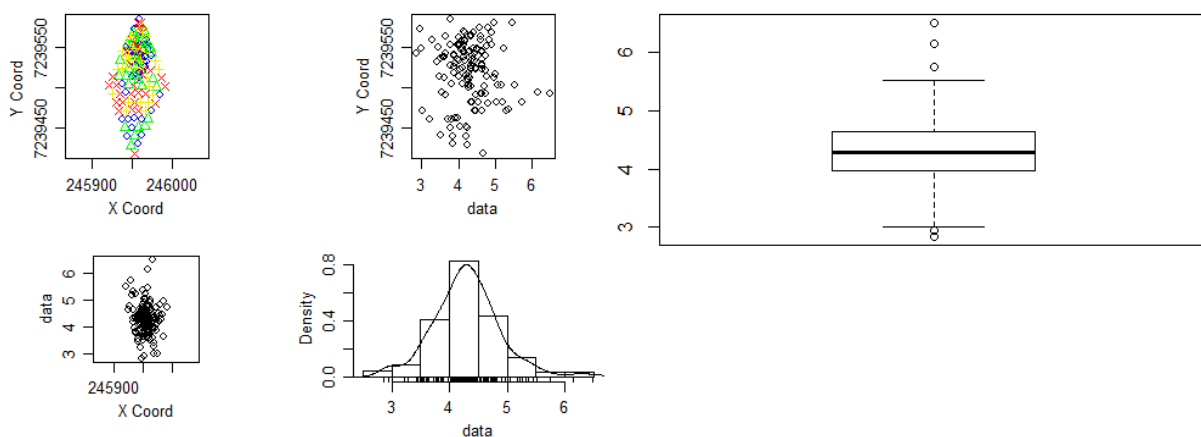


Figura 43 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,1-0,2 m em Out/2013.

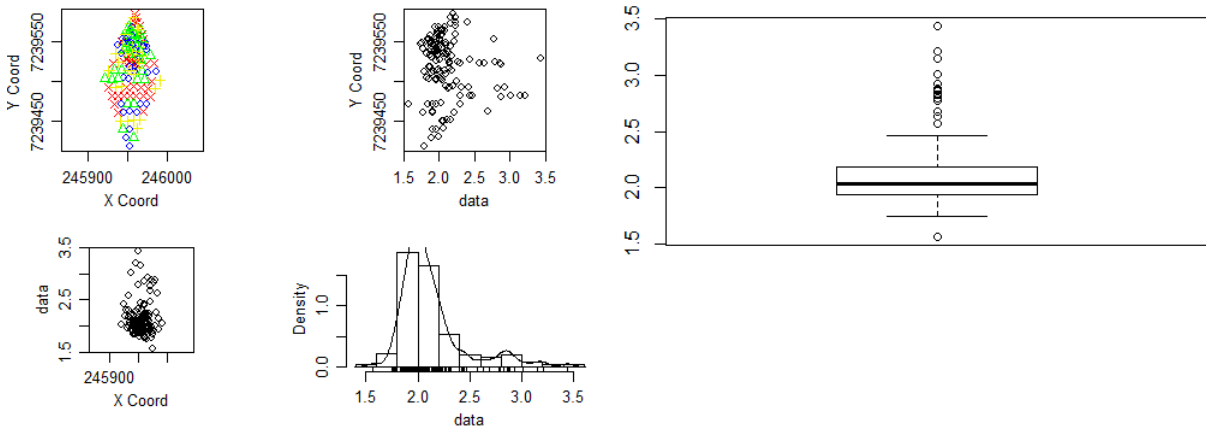


Figura 44 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,2-0,3 m em Fev/2012.

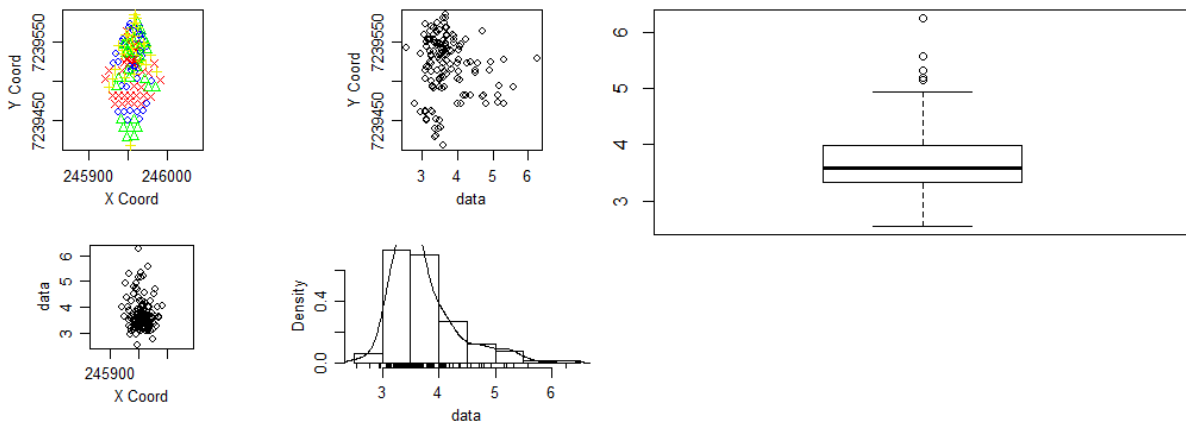


Figura 45 – Gráficos descritivos da Rp na camada de 0,2-0,3 m em Out/2013.

ANEXO C

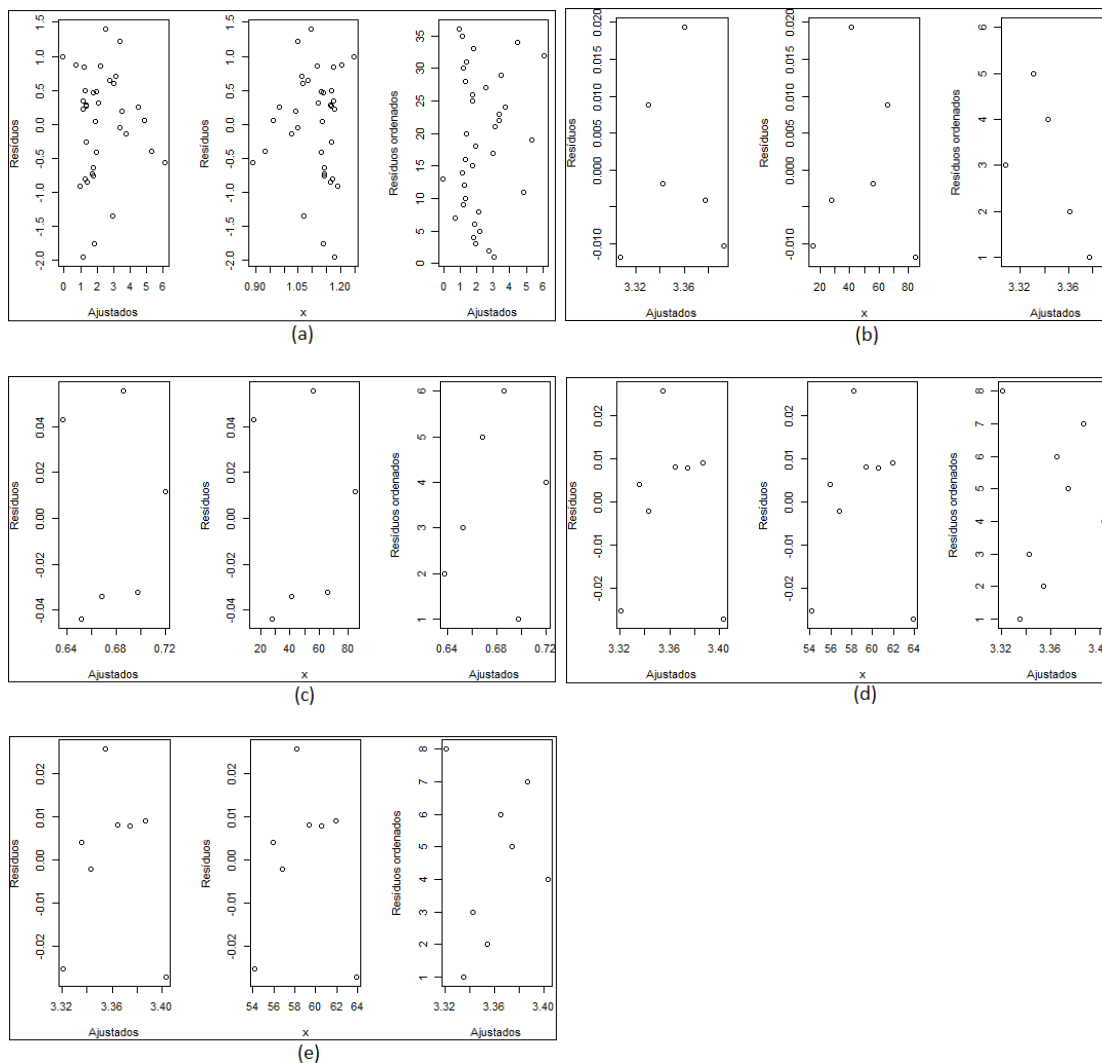


Figura 1. Normalidade dos resíduos nas análises de regressão entre D_s x $K\theta_s$ (a – modelo exponencial), $K\theta_s$ x teor de óleo (b – modelo exponencial), $K\theta_s$ x rendimento de grãos (c – modelo exponencial), G_c x teor de óleo (d – modelo logarítmico) e G_c x rendimento de grãos (e – modelo exponencial).

ANEXO D

Análise descritiva dos Atributos Químicos na coleta de 2012

Tabela 1 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (Alumínio – Al, CTC – Capacidade de Troca Catiônica, Ca – Cálcio, K – Potássio, Mg – Magnésio, MO – Matéria Orgânica e P – Fósforo) na coleta de 2012

Estatística	Al	CTC	Ca	K	Mg	MO	P
Média	0,22	10,12	6,79	158	2,49	4,65	17,29
Mínimo	0,00	5,70	2,80	36	0,90	3,10	2,20
Q1	0,10	8,70	6,20	104	1,90	4,30	8,40
Mediana	0,10	10,00	6,90	140	2,40	4,60	12,60
Q3	0,30	11,50	7,90	204	2,90	5,00	18,90
Máximo	1,70	18,80	13,80	424	4,60	8,20	76,00
S	0,28	2,10	1,60	75,43	0,72	0,63	15,86
S ²	0,08	4,41	2,56	5689,6	0,51	0,40	251,4
CV	127,27	20,75	23,56	47,74	28,92	13,55	91,73
Assimetria	2,35	0,81	0,54	1,00	0,54	1,36	2,70
Curtose	9,85	5,18	5,78	4,12	2,97	8,90	10,28
<i>p</i> -valor*	$1,7 \times 10^{-14}$	0,0003	$8,8 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-6}$	0,007	$9,2 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-16}$

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

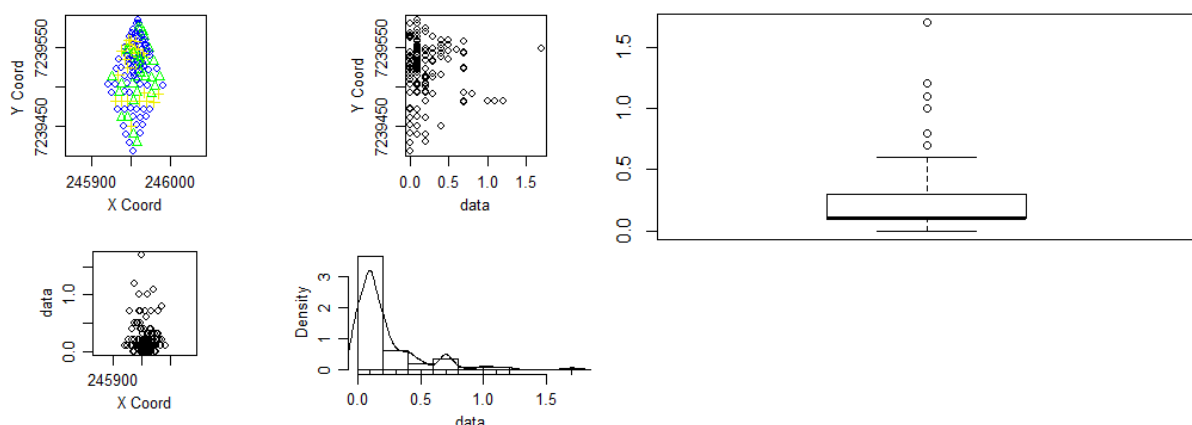


Figura 1 – Gráficos descritivos do Al em 2012.

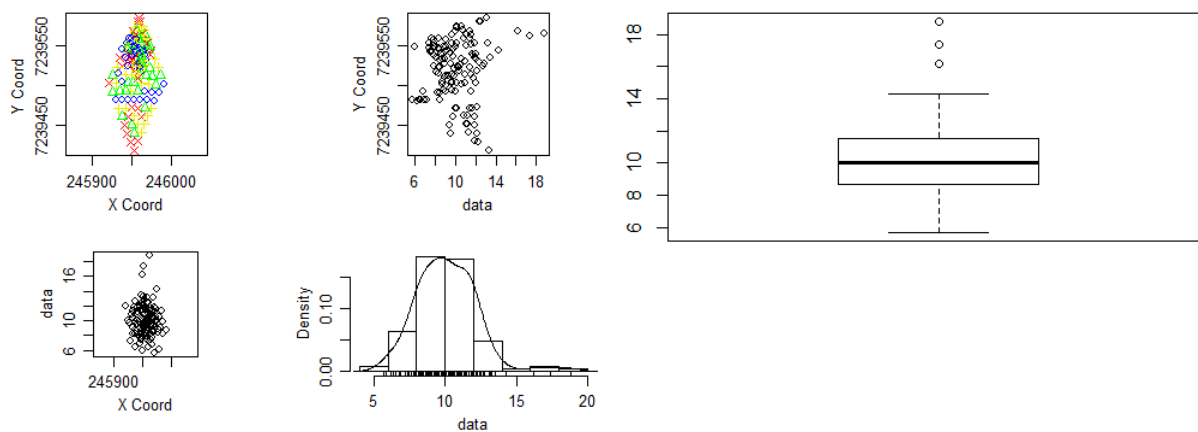


Figura 2 – Gráficos descritivos da CTC em 2012.

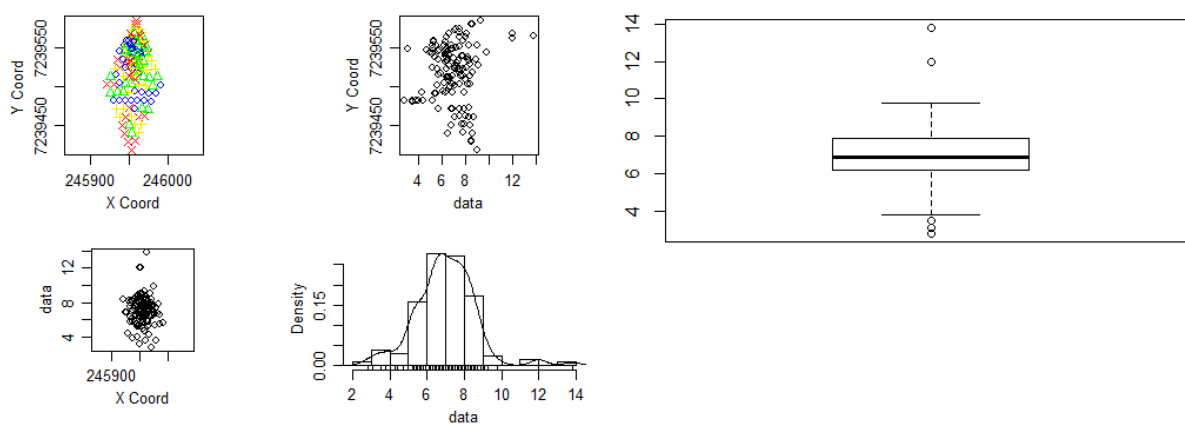


Figura 3 – Gráficos descritivos do Ca em 2012.

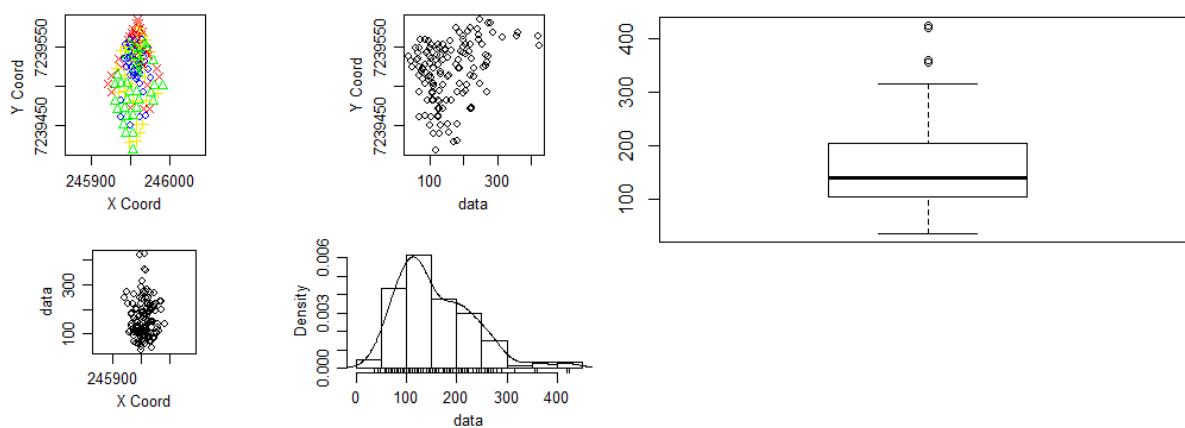


Figura 4 – Gráficos descritivos do K em 2012.

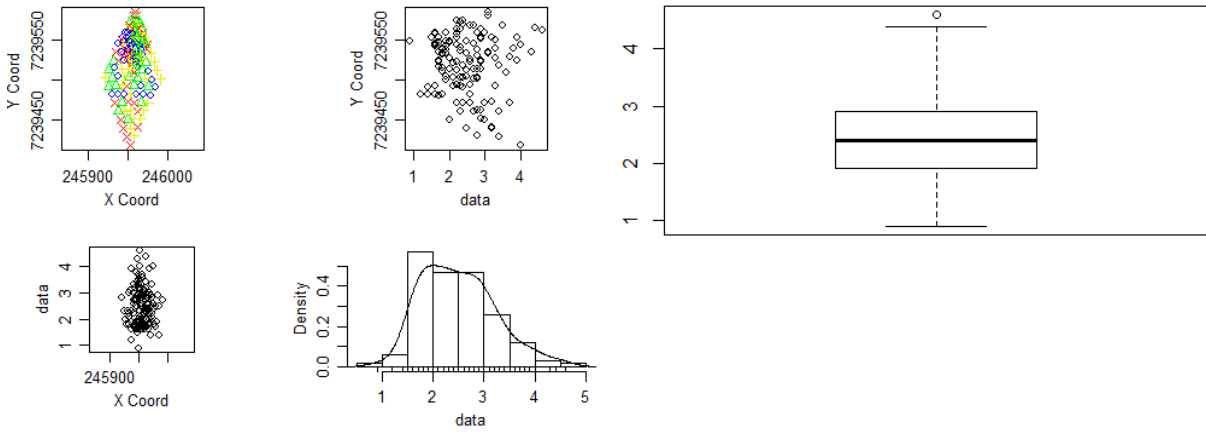


Figura 5 – Gráficos descritivos do Mg em 2012.

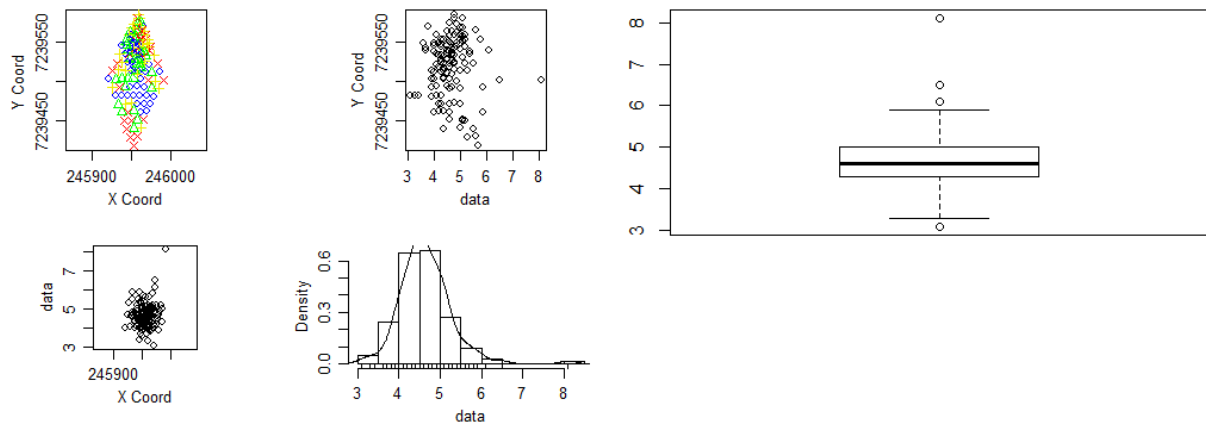


Figura 6 – Gráficos descritivos da MO em 2012.

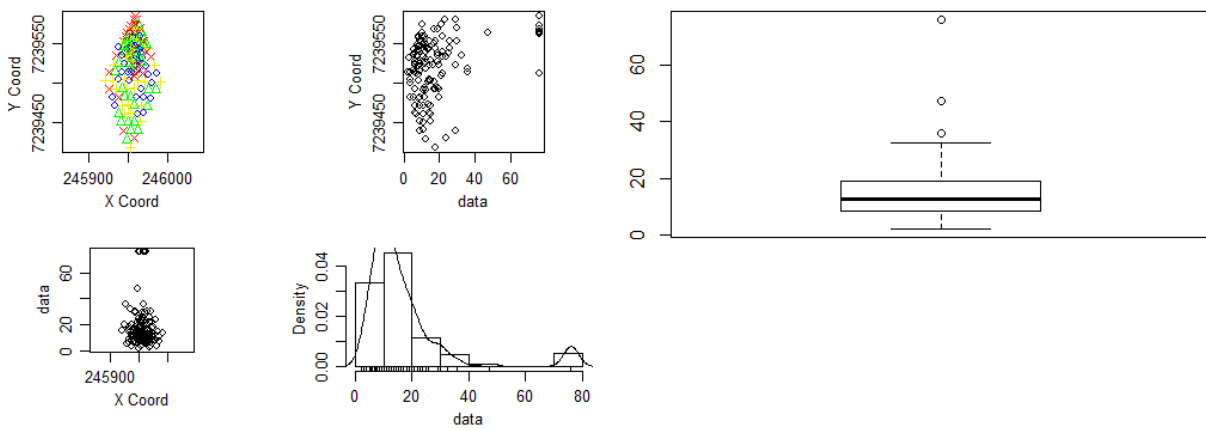


Figura 7 – Gráficos descritivos do P em 2012.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (Boro – B, Cu – Cobre, pH – Potencial de Hidrogênio, S – Enxofre, Saturação por Alumínio – SatAl, Saturação por Bases – V e Zinco – Zn) na coleta de 2012

Estatística	B	Cu	pH	S	SatAl	V	Zn
Média	0,37	3,68	5,24	25,50	2,82	58,02	6,17
Mínimo	0,10	1,80	4,50	15,50	0,00	25,30	2,10
Q1	0,30	2,60	5,10	23,00	0,80	51,60	3,40
Mediana	0,40	3,00	5,20	25,00	1,00	59,20	4,60
Q3	0,50	4,50	5,40	28,00	3,00	64,50	6,90
Máximo	0,70	9,80	6,20	40,00	28,80	84,90	28,10
S	0,17	1,67	0,28	4,82	4,28	10,61	5,11
S ²	0,03	2,78	0,08	23,20	18,30	112,6	26,14
CV	45,95	45,38	5,34	18,90	151,77	18,29	82,82
Assimetria	-0,05	1,55	0,26	0,51	3,09	-0,31	2,82
Curtose	2,06	5,06	3,42	3,56	15,02	3,09	11,42
<i>p</i> -valor*	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-11}$	0,07	0,006	$2,2 \times 10^{-16}$	0,28	$2,2 \times 10^{-16}$

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

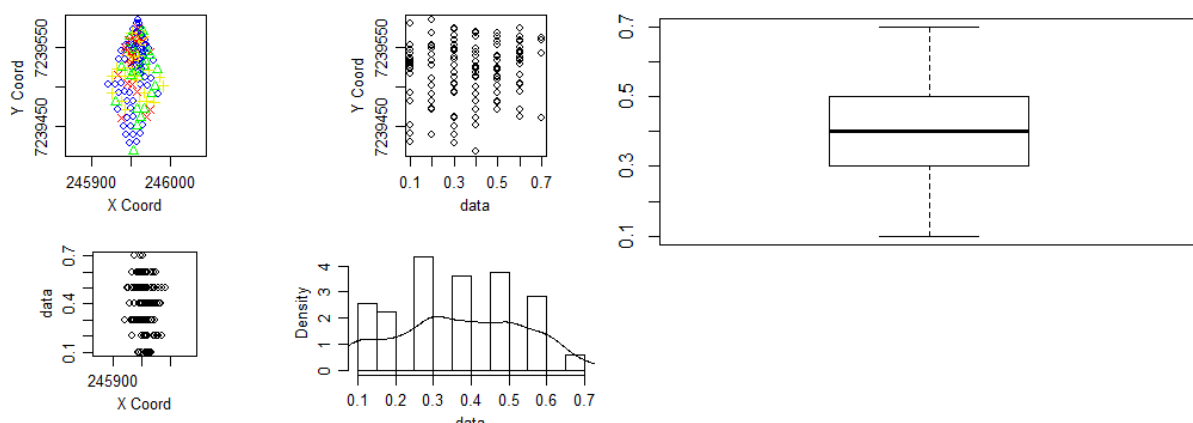


Figura 8 – Gráficos descritivos do B em 2012.

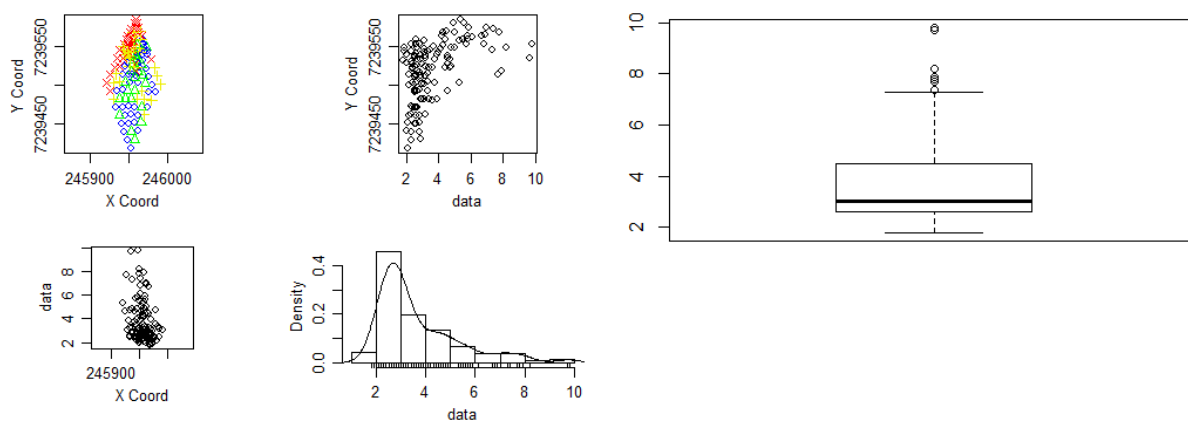


Figura 9 – Gráficos descritivos do Cu em 2012.

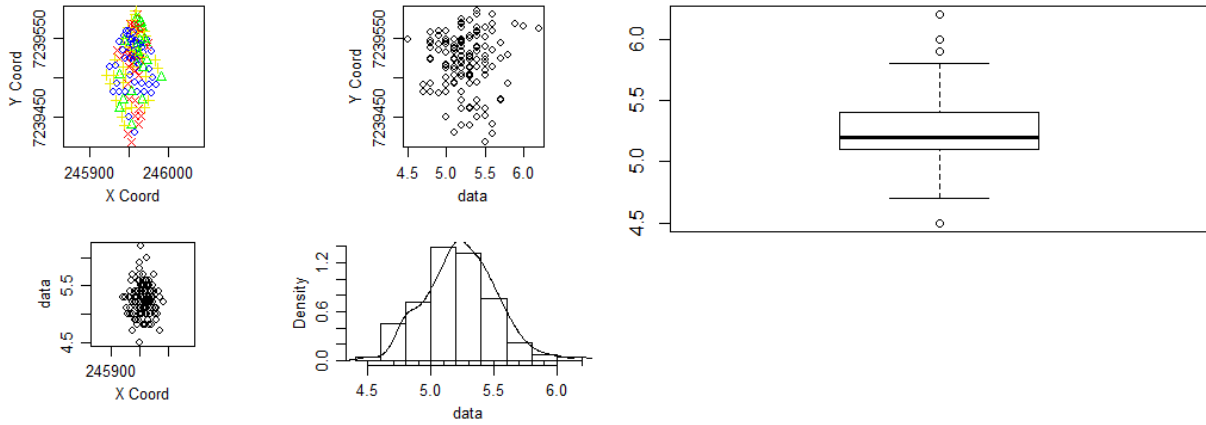


Figura 10 – Gráficos descritivos do pH em 2012.

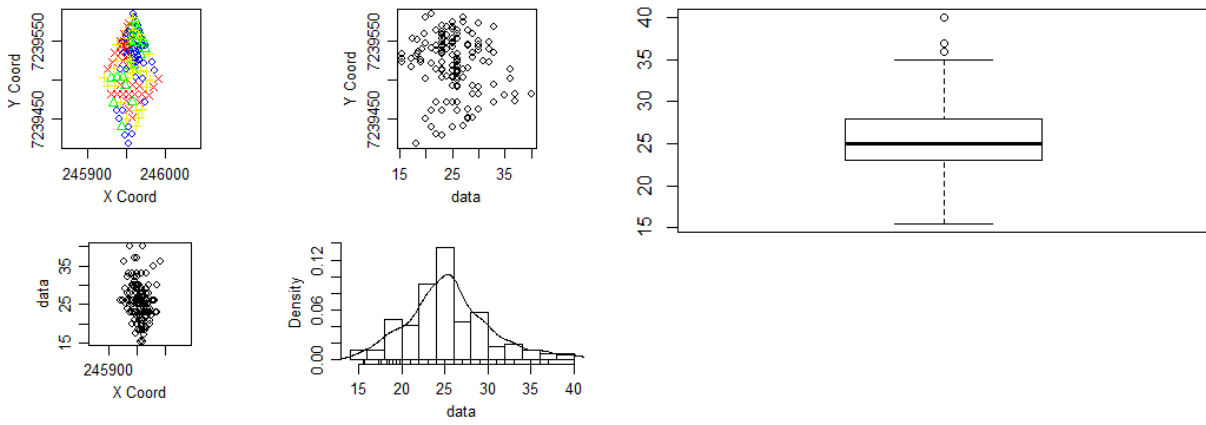


Figura 11 – Gráficos descritivos do S em 2012.

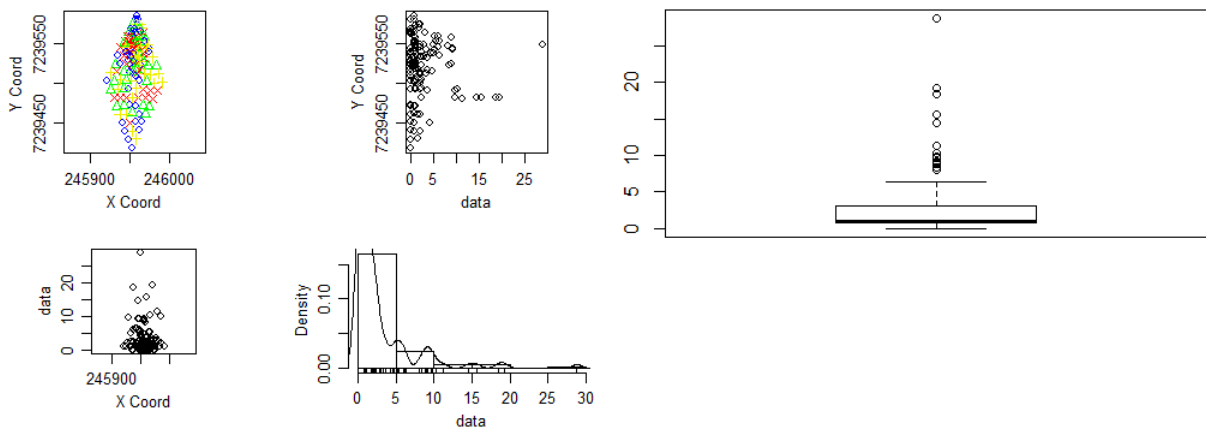


Figura 12 – Gráficos descritivos da Saturação por Al em 2012.

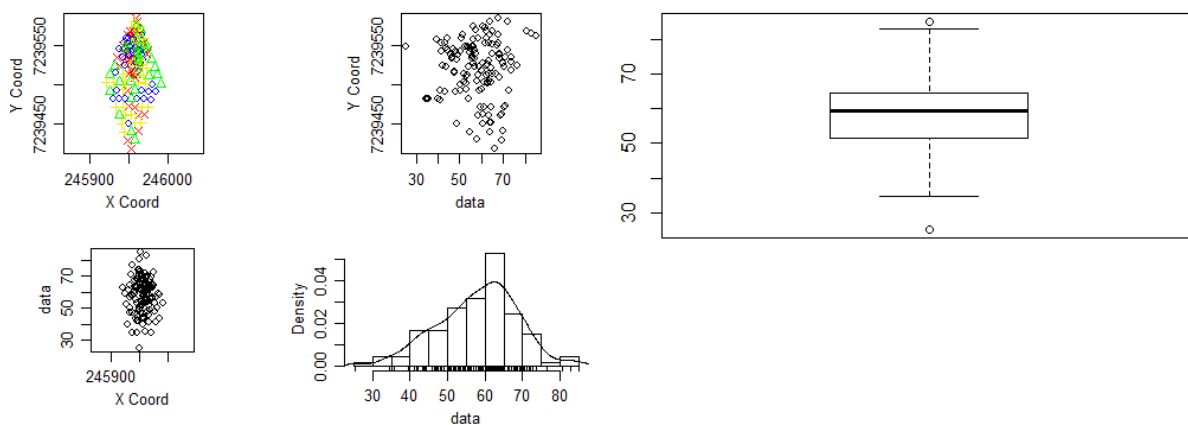


Figura 13 – Gráficos descritivos da Saturação por Bases em 2012.

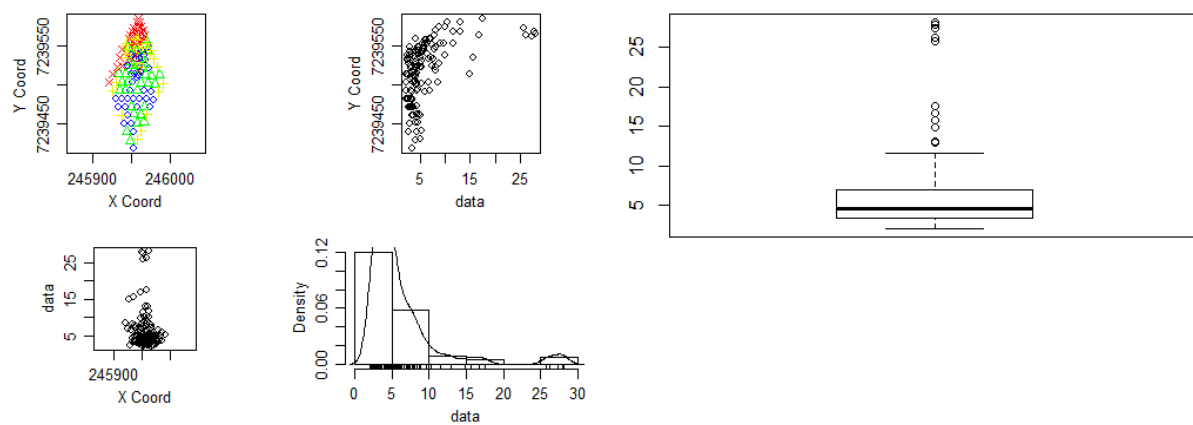


Figura 14 – Gráficos descritivos do Zn em 2012.

Análise descritiva dos Atributos Químicos na coleta de 2013

Tabela 3 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (Alumínio – Al, CTC – Capacidade de Troca Catiônica, Ca – Cálcio, K – Potássio, Mg – Magnésio, MO – Matéria Orgânica e P – Fósforo) na coleta de 2012

Estatística	Al	CTC	Ca	K	Mg	MO	P
Média	0,09	10,36	6,88	163,6	2,98	4,97	22,02
Mínimo	0,00	2,00	0,70	40,00	0,38	3,30	5,30
Q1	0,00	8,60	5,63	96,00	2,45	4,50	9,30
Mediana	0,00	10,40	7,08	132,0	3,01	4,90	12,60
Q3	0,10	12,40	8,33	200,0	3,55	5,50	19,90
Máximo	1,5	18,80	13,31	1340,0	5,77	6,20	333,3
S	0,19	3,16	2,23	127,14	1,00	0,60	38,14
S ²	0,04	9,97	4,97	16163,4	1,00	0,36	1454,4
CV	211,11	30,50	32,41	77,71	33,56	12,07	173,21
Assimetria	4,08	-0,29	-0,43	6,18	-0,19	0,06	5,82
Curtose	25,86	3,61	3,64	56,36	3,67	2,28	41,37
<i>p</i> -valor*	$2,2 \times 10^{-16}$	0,02	0,02	$2,2 \times 10^{-16}$	0,03	0,01	$2,2 \times 10^{-16}$

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

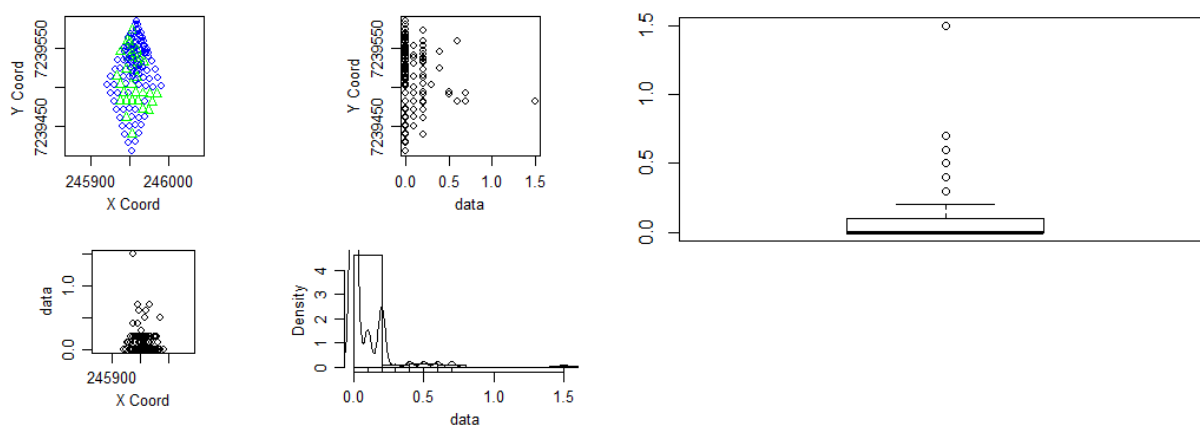


Figura 15 – Gráficos descritivos do Al em 2013.

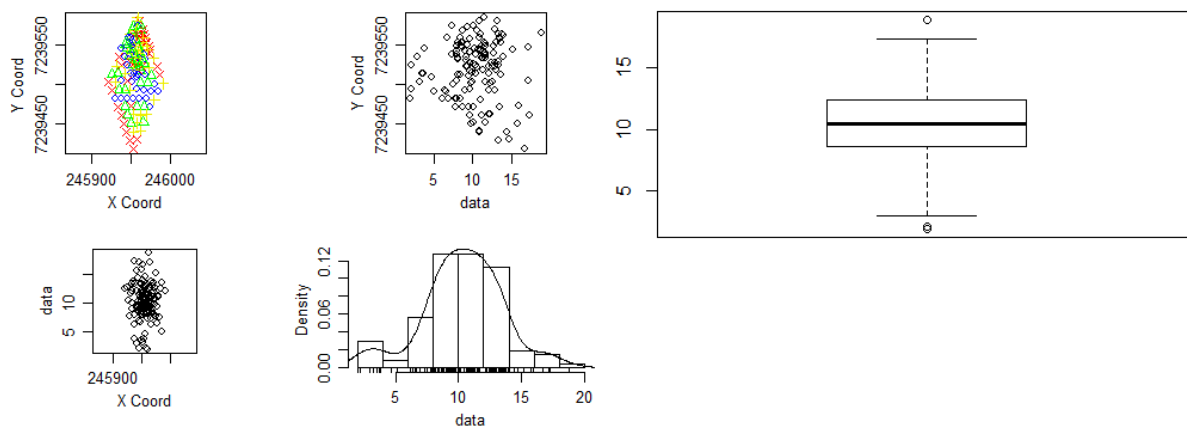


Figura 16 – Gráficos descritivos da CTC em 2013.

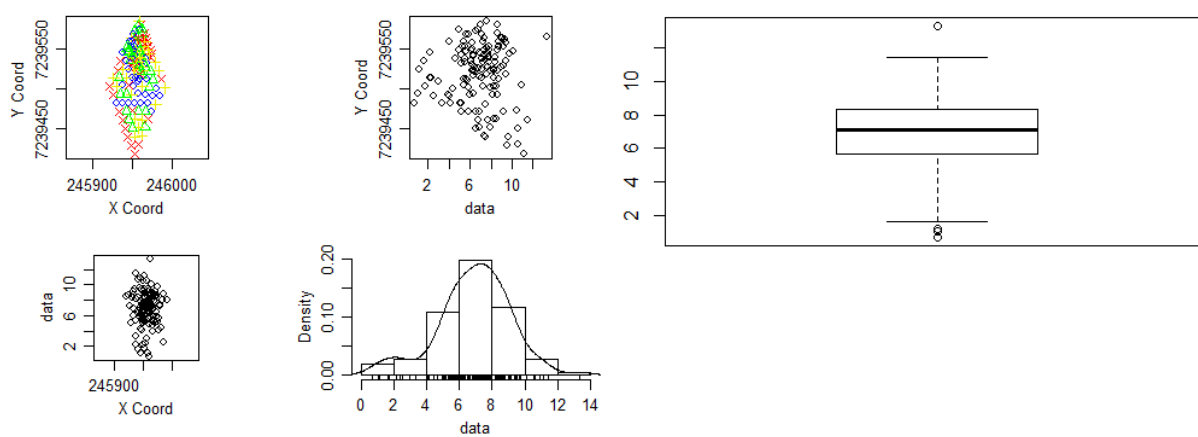


Figura 17 – Gráficos descritivos do Ca em 2013.

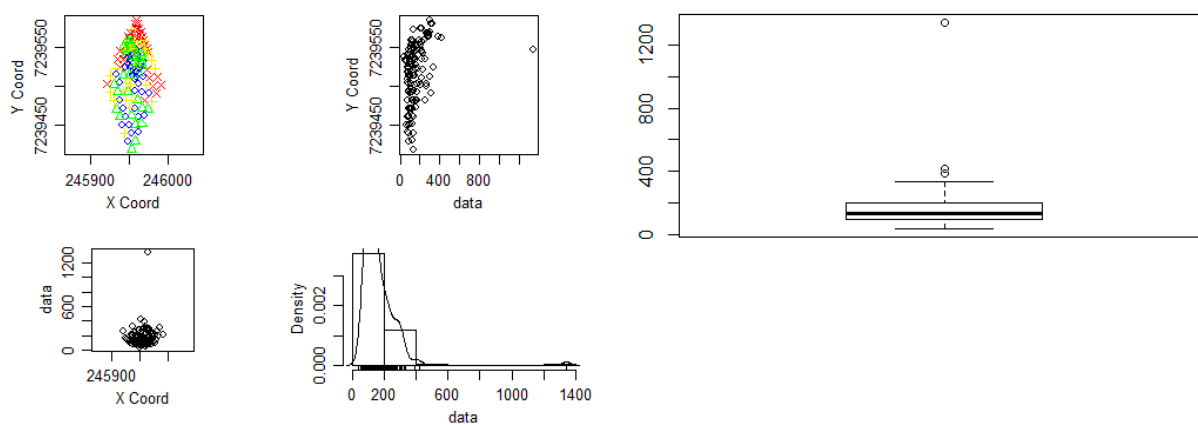


Figura 18 – Gráficos descritivos do K em 2013.

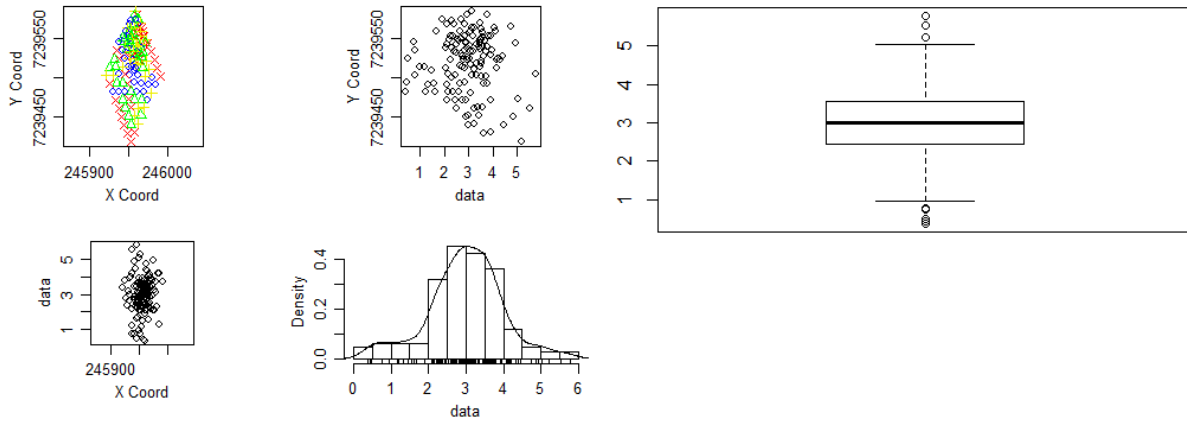


Figura 19 – Gráficos descritivos do Mg em 2013.

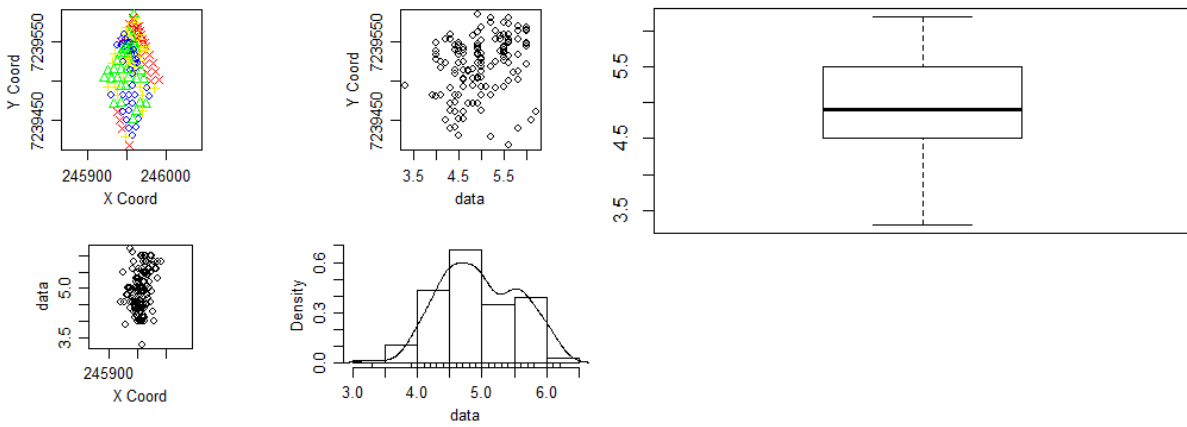


Figura 20 – Gráficos descritivos da MO em 2013.

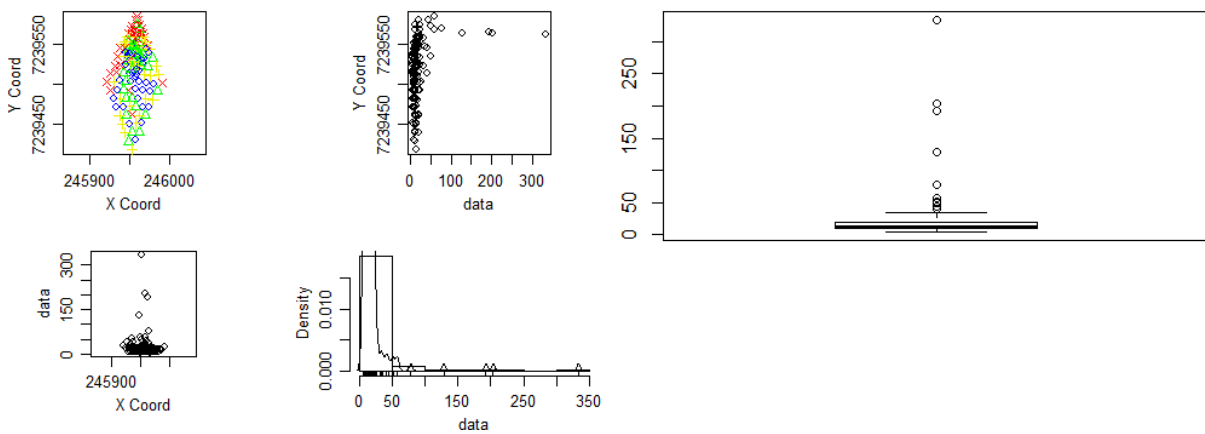


Figura 21 – Gráficos descritivos do P em 2013.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (Boro – B, Cu – Cobre, pH – Potencial de Hidrogênio, S – Enxofre, Saturação por Alumínio – SatAl, Saturação por Bases – V e Zinco – Zn) na coleta de 2013

Estatística	B	Cu	pH	S	SatAl	V	Zn
Média	0,43	2,36	5,59	7,06	1,63	64,77	5,19
Mínimo	0,20	1,28	4,70	2,00	0,00	16,80	1,50
Q1	0,30	1,91	5,40	5,00	0,00	58,60	2,96
Mediana	0,40	2,22	5,60	6,60	0,00	67,40	3,74
Q3	0,60	2,60	5,70	9,00	1,30	73,30	5,13
Máximo	0,60	6,34	6,40	17,0	30,0	87,10	39,24
S	0,12	0,73	0,29	3,36	4,52	12,61	5,75
S ²	0,02	0,54	0,08	11,29	20,47	158,9	33,06
CV	27,91	30,93	5,19	47,59	277,30	19,47	110,79
Assimetria	0,06	2,26	0,007	0,65	4,22	-1,23	4,45
Curtose	1,74	10,70	3,50	3,02	22,04	5,19	24,82
<i>p</i> -valor*	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-11}$	0,07	0,0003	$2,2 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-16}$

*obtido pelo teste de Shapiro-Wilk

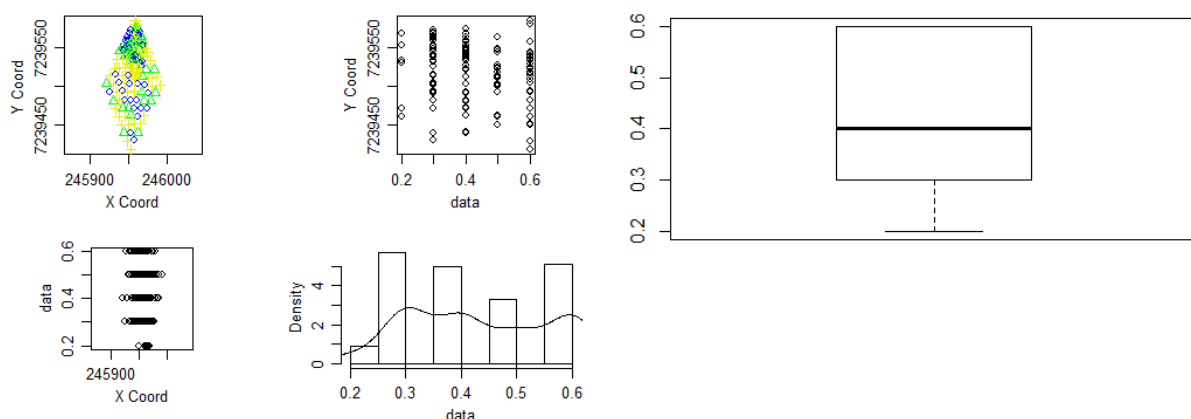


Figura 22 – Gráficos descritivos do B em 2013.

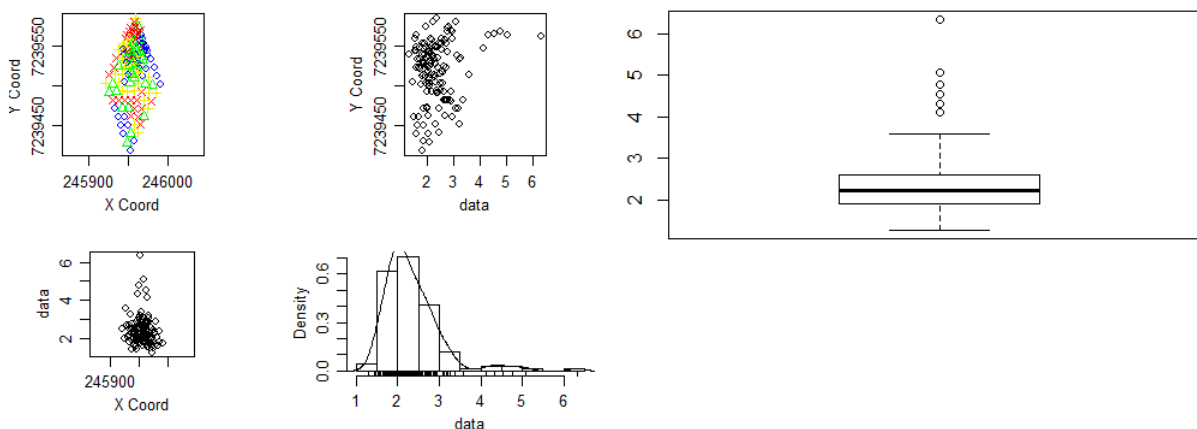


Figura 23 – Gráficos descritivos do Cu em 2013.

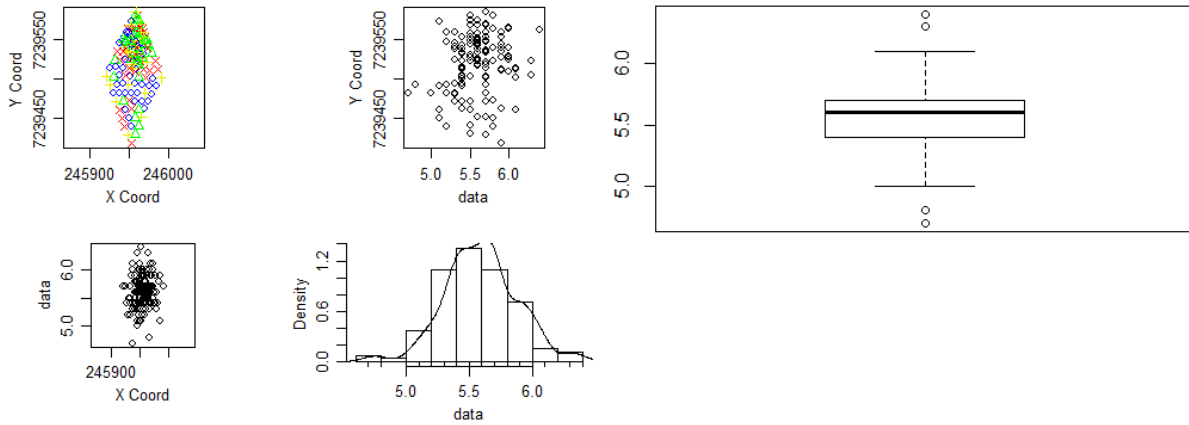


Figura 24 – Gráficos descritivos do pH em 2013.

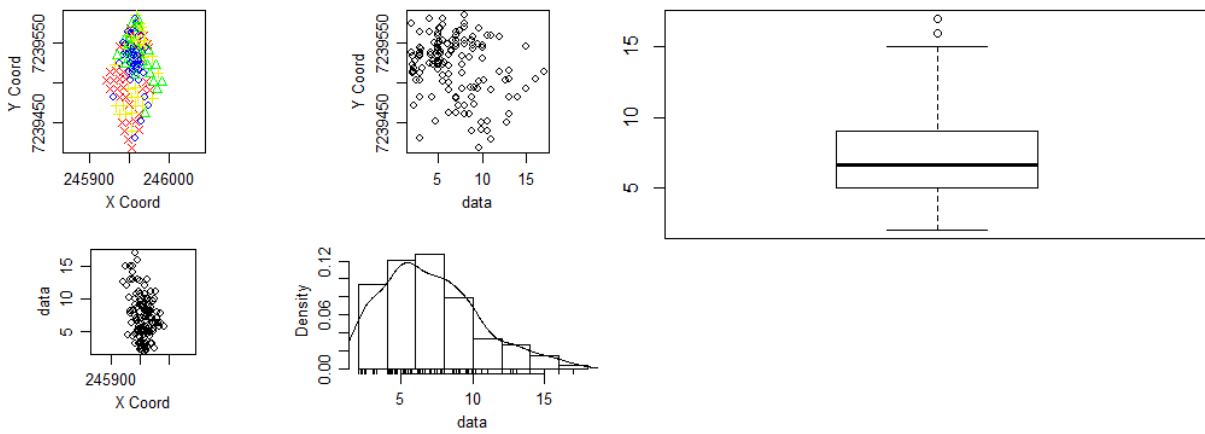


Figura 25 – Gráficos descritivos do S em 2013.

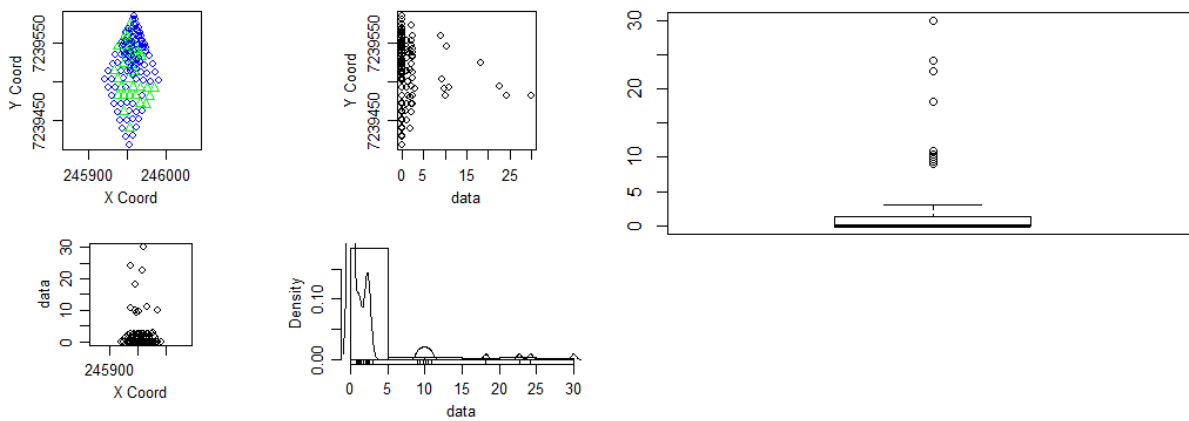


Figura 26 – Gráficos descritivos da Saturação por Al em 2013.

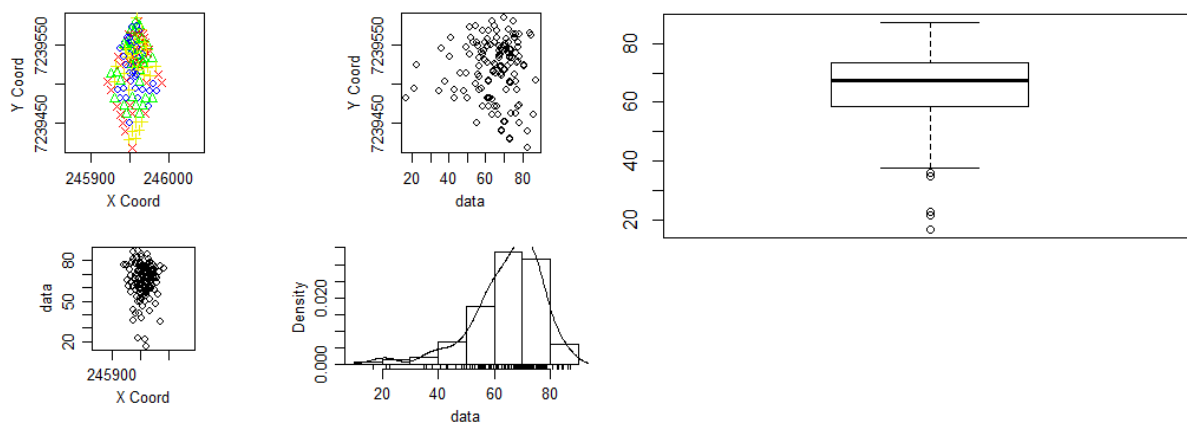


Figura 27 – Gráficos descritivos da Saturação por Bases em 2013.

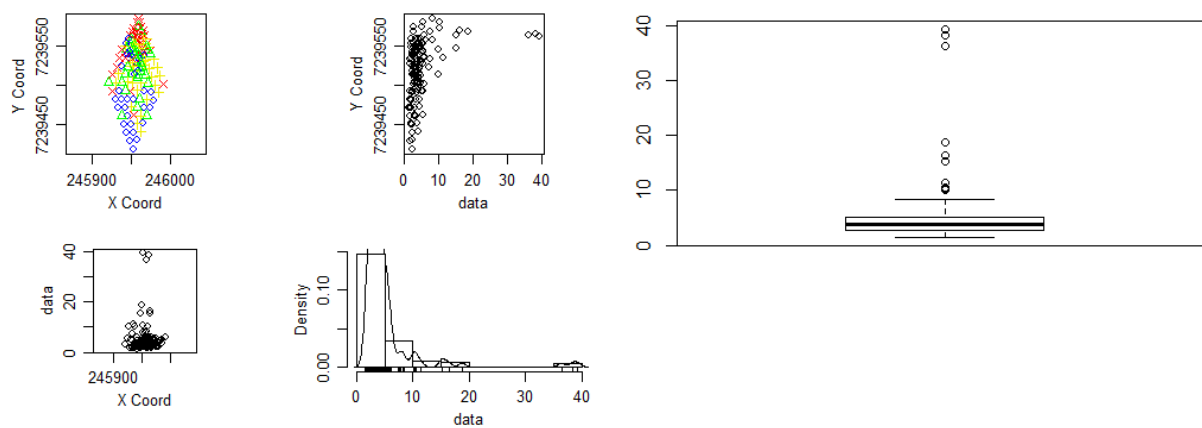


Figura 28 – Gráficos descritivos do Zn em 2013.

ANEXO E

```
#####
##### Semivariograma Cruzado baseado em Janelas Móveis #####
#####

#Lendo os dados

Var1<-read.geodata("C:/.../Var1.txt",head=TRUE,coords.col=1:2, data.col=3)

Var2<-read.geodata("C:/.../Var2.txt",head=TRUE,coords.col=1:2, data.col=3)

#Determinando as distâncias h a serem utilizadas
h<- c(.....)

tab_h<- (h)
tab_m<- rep(0,length(tab_h))
tab_scjm<- rep(0,length(tab_h))

tabela<-cbind(tab_h,tab_m,tab_scjm)

#Armazenando as distâncias menores que "h"
res<-rep(0,length(Var1$data))

#Número de pontos total
n<-Var1$data

#Contador do número de pontos dentro da janela de tamanho h
m<-0

#Somatório dos valores
soma<-0

#Valor da semivariância cruzada
scjm<-0

#Contador para posicionar na linha correta da tabela
p<-0

for (h in h) {

  p<-p+1

  for(i in 1:length(n)){ #i = número do ponto central

    for(j in 1:length(n)){ #j = número do ponto a ser testado
```



```

aux          <-          sqrt(((Var1$coords[i,1]-Var1$coords[j,1])^2)+((Var1$coords[i,2]-
Var1$coords[j,2])^2))

if(aux <= h && aux > 0){

    m<-1+m # conta quantos pontos estão dentro da janela

    aux2 <- ((Var1$data[i] - Var1$data[j]) * (Var1a$data[i] - Var1a$data[j]))/(2*m) #cálculo

    soma<-soma+aux2#somatório do resultado acima

}

}
}
scjm <- (soma*100)/n #resultado final do semivariograma cruzado baseado em janelas
móveis para uma distância

#Montar a tabela com os resultados
tabela[p,2]<-m
tabela[p,3]<-scjm
print
print
print("-----")
print("      Tabela com os Resultados")
print("-----")
print(tabela)
print("-----")
}

#gerando o gráfico
plot(tabela[,1],tabela[,3],xlab="distância",ylab="SCJM",pch=1, main="Var1 x Var2")

```