

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO
SOLO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA EM UMA ÁREA
COMERCIAL**

CLEMENTINA SCHERPINSKI

**CASCADEL – PR – BRASIL
AGOSTO– 2005**

CLEMENTINA SCHERPINSKI

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO
SOLO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA EM UMA ÁREA
COMERCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

Co-orientador: Dr. Márcio Antônio Vilas Boas

CASCADEL – PR – BRASIL

Agosto– 2005

CLEMENTINA SCHERPINSKI

“Variabilidade espacial de atributos físicos e hídricos do solo e da produtividade da cultura da soja em uma área comercial”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves
UEM – Maringá – PR

Prof. Dr. Silvio César Sampaio
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof^a. Dr^a. Maria Hermínia Ferreira Tavares
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Cascavel, 05 de agosto de 2005.

*Aos meus pais
Tadeu Idick Scherpinski (in memoriam) e
Amélia Scherpinski,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Dr. Miguel Angel Uribe Opazo, pela orientação prestada, pelos questionamentos pertinentes com postura ética, profissional sempre presente e acessível em todos os momentos desta caminhada.

Ao co-orientador Dr. Marcio Antonio Vilas Boas e ao Ms. Edson Antonio Alves da Silva, profissionais comprometidos com a pesquisa científica e que orientaram os primeiros passos desta.

Aos professores: Ms Jerry Adriani Johann, pela orientação em campo e Dr. Deonir Secco, pela contribuição prestada nas análises laboratoriais. Aos pesquisadores: Claudinei Lunkes, Joelmir Borssói, Mari Roman e ao sobrinho Edinei Cieslak, pelo árduo trabalho, por vezes sufocante, de coletar dados em campo e em laboratório.

À Fundação Araucária e à CAPES, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Aos irmãos Nelson, pela ajuda prestada em campo, e à Neusa, pelo acompanhamento e preocupação. À Patrícia Carla Mucelim, pelo carinho e pela torcida. Para Luan Michel Scherpinski pela vontade de ajudar.

Às amigas, Patrícia Drechmer e Dione Christi Milani, pela amizade sincera e em especial à Dione, pela ajuda e socorro em todos os momentos desta caminhada. Duas pessoas iluminadas.

Ao Mário Antonio, pelo carinho e compreensão nos momentos de estudo. Com amor.

SUMÁRIO

<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</u>	<u>4</u>
<u>2.1 DENSIDADE DO SOLO, MICROPOROSIDADE E MACROPOROSIDADE.....</u>	<u>5</u>
<u>2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO....</u>	<u>7</u>
<u>2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS</u> <u>DO SOLO.....</u>	<u>15</u>
<u>2.4 PRODUTIVIDADE DA SOJA.....</u>	<u>17</u>
<u>2.5 GEOESTATÍSTICA.....</u>	<u>18</u>
<u>2.5.1 Variáveis Regionalizadas.....</u>	<u>19</u>
<u>2.5.2 Semivariograma.....</u>	<u>21</u>
<u>2.5.2.1 Modelos com patamar</u>	<u>24</u>
<u>2.5.2.2 Modelos sem patamar.....</u>	<u>26</u>
<u>2.5.3 krigagem Ordinária.....</u>	<u>28</u>
<u>2.5.4 Semivariograma Cruzado.....</u>	<u>28</u>
<u>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>31</u>
<u>3.1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA ESTUDADA.....</u>	<u>31</u>
<u>3.2 AMOSTRAGEM.....</u>	<u>31</u>
<u>3.3 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DOS DADOS.....</u>	<u>33</u>
<u>3.3.1 Densidade, Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total do</u> <u>Solo.....</u>	<u>33</u>
<u>3.3.2 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado e Infiltração da Água no Solo</u> <u>.....</u>	<u>34</u>
<u>3.3.3 Produtividade da Soja.....</u>	<u>36</u>
<u>3.4 ANÁLISE DOS DADOS.....</u>	<u>36</u>
<u>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>38</u>
<u>4.1 ANÁLISE DESCRITIVA, INFERÊNCIAS CLÁSSICAS E ANÁLISE DA</u> <u>VARIABILIDADE ESPACIAL.....</u>	<u>38</u>
<u>4.1.1 Análise Descritiva e Inferências Clássicas dos Atributos Físicos do Solo</u>	<u>38</u>
<u>4.1.1.1 Densidade do solo (Ds).....</u>	<u>39</u>
<u>4.1.1.2 Microporosidade do solo.....</u>	<u>41</u>
<u>4.1.1.3 Macroporosidade do solo.....</u>	<u>43</u>

4.1.1.4 Porosidade total do solo.....	45
4.1.2 Propriedades Hídricas do Solo.....	46
4.1.2.1 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	46
4.1.2.2 Infiltração da água no solo.....	48
4.1.2.3 Produtividade da soja.....	50
4.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	53
4.2.1 Atributos Físicos do Solo	53
4.2.2 Atributos Hídricos do Solo	56
4.2.3 Produtividade da soja.....	58
4.3 ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL ATRAVÉS DOS SEMIVARIOGRAMAS.....	60
4.4 MAPAS TEMÁTICOS PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO E PARA A PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	69
4.5 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS EM ESTUDO E DA PRODUTIVIDADE DA SOJA	75
4.5.1 Correlação Linear de Pearson.....	75
4.5.2 Correlação Não Paramétrica de Spearman.....	76
4.5.3 Correlação Espacial.....	77
5 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Categoria de meios porosos usados para a estimação de	14@~
TABELA 2 - Análise exploratória dos atributos físicos do solo em estudo na profundidade 0 - 10 cm.....	38@~
TABELA 3 - Análise exploratória dos atributos físicos do solo em estudo na profundidade 10 - 20 cm.....	39@~
TABELA 4 - Análise exploratória dos atributos hídricos do solo em estudo	47@~
TABELA 5 - Análise exploratória dos três cultivares estudados e da produtividade total.....	50@~
TABELA 6 - Modelos utilizados na correção de tendência.....	59@~
TABELA 7 - Resultados da análise geoestatística para os atributos em estudo	61@~
TABELA 8 - Resultados da análise do coeficiente linear de Pearson para os atributos em estudo e da produtividade da soja.....	75@~
TABELA 9 - Resultados da análise do coeficiente não paramétrico de Spearman para os atributos em estudo e da produtividade da soja	76@~
TABELA 10 - Coeficientes de correlação espacial para os atributos em estudo e da produtividade da soja.....	77@~
TABELA 11 - Alcances (m) encontrados dos semivariogramas cruzados para os atributos em estudo e da Produtividade da Soja.....	80@~

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Semivariograma experimental.....	23@~
Figura 2 - Representação gráfica de semivariogramas experimentais de modelos teóricos com patamar.....	26@~
Figura 3 - Representação gráfica dos modelos potência, linear e logaritmo com efeito pepita.....	27@~
Figura 4 - Esquema amostral da área do experimento.....	32@~
Figura 5 - Permeâmetro de Guelph.....	35@~
Figura 6 - Poço construído para obtenção das leituras de fluxo.....	36@~
Figura 7 - Boxplot para a densidade do solo nas profundidades 0 -10 cm (1) e 10 - 20 cm (2).....	40@~
Figura 8 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para a densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	40@~
Figura 9 - Boxplot para o atributo microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2).....	42@~
Figura 10 - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	43@~
Figura 11 - Boxplot para o atributo macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2).....	44@~
Figura 12 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para a macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	45@~
Figura 13 - Boxplot para o atributo porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2).....	46@~
Figura 14 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para o atributo porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b). 46@~	46@~
Figura 15 - Gráfico Boxplot para o atributo condutividade hidráulica do solo saturado.....	48@~

Figura 16 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo condutividade hidráulica do solo saturado.	48@~
Figura 17 - Gráfico Boxplot para o atributo infiltração da água no solo.....	49@~
Figura 18 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo infiltração da água no solo.....	50@~
Figura 19 - Gráfico Boxplot para os três cultivares para a produtividade da soja	51@~
Figura 20 - Gráfico Boxplot para o atributo produtividade total da soja.....	52@~
Figura 21 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo produtividade total da soja.....	53@~
Figura 22 - Gráfico post plot para a Densidade do Solo (mg m ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b).....	54@~
Figura 23 - Gráfico post plot para a Microporosidade do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b).....	54@~
Figura 24 - Gráfico post plot para a Macroporosidade do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b).....	55@~
Figura 25 - Gráfico post plot para a Porosidade Total do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b).....	55@~
Figura 26 - Gráfico postplot para a condutividade hidráulica (cm s ⁻¹) (a) e infiltração da água no solo (mm h ⁻¹) (b).....	57@~
Figura 27 - Gráfico post plot para a produtividade da soja (t ha ⁻¹).....	58@~
Figura 28 - Semivariograma da densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	62@~
Figura 29 - Semivariograma da microporosidade do solo na profundidade 0 - 10 cm (a) e dos resíduos da microporosidade do solo na profundidade 10 - 20 cm (b).....	63@~
Figura 30 - Semivariograma da macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	63@~
Figura 31 - Semivariograma da porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	64@~
Figura 32 - Semivariograma da condutividade hidráulica do solo saturado (cm s ⁻¹ .10 ⁴) (a) e da infiltração da água no solo (b).....	64@~
Figura 33 - Semivariograma da produtividade da soja (t ha ⁻¹).....	65@~

Figura 34 - Envelopes de semivariograma para a densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	66@~
Figura 35 - Envelopes de semivariograma para a microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	66@~
Figura 36 - Envelopes de semivariograma para a macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	67@~
Figura 37 - Envelopes de semivariograma para a porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	68@~
Figura 38 - Envelopes de semivariograma para a condutividade hidráulica do solo saturado (a) e da infiltração da água no solo (b).....	68@~
Figura 39 - Envelope de semivariograma para a produtividade da soja.....	69@~
Figura 40 - Mapas do atributo Densidade do Solo (mg m ³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	70@~
Figura 41 - Mapas da Microporosidade do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	70@~
Figura 42 - Mapas do atributo Macroporosidade do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	71@~
Figura 43 - Mapas do atributo Porosidade Total do Solo (dm ³ dm ⁻³) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b).....	72@~
Figura 44 - Mapas dos atributos hídricos do solo (cm s ⁻¹), Condutividade Hidráulica (a) e Infiltração da Água no Solo (mm h ⁻¹) (b).....	73@~
Figura 45 - Mapa da Produtividade da Soja (t ha ⁻¹).....	74@~
Figura 46 - Semivariograma cruzado para a Densidade do Solo nas duas profundidades estudadas (a) e para a Densidade do Solo (0 - 10 cm) e a Produtividade (b).....	78@~
Figura 47 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 - 10 cm) e densidade do solo (10 - 20 cm) (a) e para a microporosidade (0 - 10 cm) e a produtividade (b).....	78@~
Figura 48 - Semivariograma cruzado para a Porosidade Total (0 - 10 cm) e Produtividade (a) e para a Macroporosidade (10 - 20 cm) e a Produtividade (b).....	79@~
Figura 49 - Semivariograma cruzado para a Porosidade Total (10 - 20 cm) e a Produtividade.....	79@~
Figura 50 - Representação gráfica de Elrick.....	93@~

Figura 51 - Gráficos de dispersão para o atributo densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm.....	94@~
Figura 52 - Gráficos de dispersão para o atributo microporosidade do solo na profundidade 0 – 10 cm.....	95@~
Figura 53 - Gráficos de dispersão para o atributo macroporosidade do solo na profundidade 0 – 10 cm.....	96@~
Figura 54 - Gráficos de dispersão para o atributo porosidade total do solo na profundidade 0 – 10 cm.....	97@~
Figura 55 - Gráficos de dispersão para o atributo densidade do solo na profundidade 10 – 20 cm.....	98@~
Figura 56 - Gráficos de dispersão para o atributo microporosidade do solo na profundidade 10 – 20 cm.....	99@~
Figura 57 - Gráficos de dispersão para o atributo macroporosidade do solo na profundidade 10 – 20 cm.....	100@~
Figura 58 - Gráficos de dispersão para o atributo porosidade total do solo na profundidade 10 – 20 cm.....	101@~
Figura 59 - Gráficos da média móvel versus desvio padrão para os atributos físicos do solo nas profundidades 0 – 10 cm (A) e 10 – 20 cm (B)	102@~
Figura 60 - Gráficos de dispersão para o atributo condutividade hidráulica	103@~
Figura 61 - Gráficos de dispersão para o atributo Infiltração da água no solo	104@~
Figura 62 - Gráficos da média móvel versus desvio padrão para os atributos hídricos do solo.....	105@~
Figura 63 - Gráficos de dispersão para o atributo produtividade da soja..	106@~
Figura 64 - Gráfico da média móvel versus desvio padrão para o atributo produtividade da soja.....	107@~
Figura 65 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e microporosidade(0 – 10 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a macroporosidade (0 – 10 cm) (b).....	113@~
Figura 66 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e microporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 –20 cm) (b).....	113@~

- Figura 67 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e porosidade total (10 – 20 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica(b)..... 113@~
- Figura 68 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e infiltração (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a macroporosidade (0 – 10 cm) (b)..... 114@~
- Figura 69 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e porosidade total (0 – 10 cm) (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 –20 cm) (b)..... 114@~
- Figura 70 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e macroporosidade (10 –20 cm) (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 –20 cm) (b)..... 114@~
- Figura 71 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e infiltração (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (b)..... 115@~
- Figura 72 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (0 – 10 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a densidade (10 – 20 cm) (b)..... 115@~
- Figura 73 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 –20 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (b)..... 115@~
- Figura 74 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 –20 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a infiltração (b)..... 116@~
- Figura 75 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a produtividade (b)..... 116@~
- Figura 76 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a densidade (10 –20 cm) (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 – 20 cm) (b)..... 116@~
- Figura 77 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 –20 cm) (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (b)..... 117@~

Figura 78 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a infiltração (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (b).....	117@~
Figura 79 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 –20 cm) e a microporosidade (10 –20 cm) (a) e para a densidade (10 –20 cm) e a macroporosidade (10 –20 cm) (b).....	117@~
Figura 80 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 –20 cm) (a) e para a densidade (10 –20 cm) e a infiltração (10 –20 cm) (b).....	118@~
Figura 81 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (a) e para a densidade (10 –20 cm) e a produtividade (b).....	118@~
Figura 82 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a microporosidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 20 cm) (b).....	118@~
Figura 83 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a microporosidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b).....	119@~
Figura 84 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a produtividade (a) e para a macroporosidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (b).....	119@~
Figura 85 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a macroporosidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b).....	119@~
Figura 86 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a porosidade total (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b).....	120@~
Figura 87 - Semivariograma cruzado para a infiltração e a condutividade (a) e para a infiltração e a produtividade (b).....	120@~
Figura 88 - Semivariograma cruzado para a condutividade e para a produtividade.....	120@~

RESUMO

Estudos que envolvam os atributos físicos e hídricos do solo são de suma importância para o desenvolvimento da agricultura sustentável. Quando as áreas de terras cultivadas são utilizadas com intensa produção agrícola, o solo apresenta alterações em seus atributos físicos e hídricos. A viabilidade econômica da produção agrícola depende desses atributos e requer estudos detalhados sobre a variabilidade espacial dos solos. Dentre os atributos hídricos destaca-se a Condutividade Hidráulica que se caracteriza pela facilidade com que a água é conduzida através do solo e é de fundamental importância para um bom desenvolvimento da agricultura. Atualmente, a Condutividade Hidráulica do solo é um dos principais parâmetros utilizados para estudos que envolvam o fluxo de água no solo. Este trabalho tem por objetivo estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos (densidade do solo, microporosidade, macroporosidade, porosidade total) e atributos hídricos (condutividade hidráulica, infiltração da água no solo) e da produtividade da soja, com enfoque em Agricultura de Precisão. Buscou-se entender o comportamento dos atributos do espaço físico, ligados à produção agrícola da soja em uma área comercial na região Oeste do Paraná. Para as análises dos atributos em estudo foram utilizados semivariogramas e envelopes para a verificação da estrutura de dependência espacial e construção de mapas temáticos através da krigagem ordinária. Para a verificação da correlação espacial dos atributos físicos e hídricos estudados com a produtividade da soja foram construídos semivariogramas cruzados. De modo geral todos os atributos apresentaram dependência espacial com exceção do atributo Densidade do Solo na profundidade (0 – 10 cm). Foi encontrada correlação espacial entre a Produtividade da Soja e a Densidade do solo nas duas profundidades estudadas e também entre a Produtividade e os atributos Microporosidade (0 – 10 cm), Macroporosidade (10 – 20 cm) e Porosidade Total do Solo (10 – 20 cm). Considerou-se o uso da geoestatística adequado para este estudo.

Palavras-chave: atributos físicos, atributos hídricos, produtividade, geoestatística.

ABSTRACT

Studies that involve the physical attributes and hydrics of the soil are important for the development of the maintainable agriculture. When the areas of cultivated lands are used with intense agricultural production, the soil presents alterations in their physical attributes and hydrics. The economical viability of the agricultural production depends of these attributes and it requests more detailed studies about the space variability of the soils. Among the attributes hydrics stands out the Hydraulic Conductivity that is characterized by the easiness with that the water is driven through the soil and it is important for a good development of the agriculture. Nowadays, the Hydraulic Conductivity of the soil is one of the main parameters used for studies that involve the flow of water in the soil. This work has for objective to study the space variability of the physical attributes (bulk density, micro porosity, macro porosity, total porosity) and attributes hydrics (hydraulic conductivity, infiltration of the water in the soil of the soil) and of the productivity of the soy, with focus in Agriculture of Precision. It was looked for to understand the behavior of the attributes of the physical space, linked to the agricultural production of the soy in a commercial area in the West of Paraná. For the analyses of the attributes in study variograms and graph h-scatterplot were used for the verification of the structure of space dependence and construction of thematic maps through the ordinary kriging. For the verification of the space correlation of the physical attributes and hydrics studied with the productivity of the soy crossed variograms were built. In general all of the attributes presented space dependence except for the attribute Density of the Soil in the depth (0 - 10 cm). It was found space correlation between the Productivity of the Soy and the Density of the Soil in the two studied depths and also between the Productivity and the attributes Microporosidade (0 - 10 cm), Macroporosidade (10 - 20 cm) and Total Porosity of the Soil (10 - 20 cm). Therefore, it was considered appropriated the use of geostatistic for this study.

Key-works: physical attributes, hydric attributes, productivity, geostatistic.

INTRODUÇÃO

A mais antiga atividade humana é a agricultura. Existe há cerca de 18 mil anos. Ainda hoje mais da metade da população mundial sobrevive do trabalho em setores agrícolas, que sustentam a produção de alimentos e outros produtos agrícolas para cerca de 6,5 bilhões de habitantes do planeta. A principal meta da agricultura hoje é regular as condições ambientais para obter maior produção de alimento a partir da dinâmica de transformações orgânicas naturais.

Atualmente existe uma conscientização maior sobre os problemas resultantes do modelo do sistema agrícola, como a utilização de inseticidas, herbicidas e adubos químicos em excesso. Busca-se, uma alimentação saudável de acordo com os novos padrões de comportamento que valorizam a saúde, o bem estar e a conservação ambiental.

Se, durante longo tempo, num mesmo ambiente, cultiva-se uma mesma espécie, essa prática tende a reduzir a fertilidade do solo, pois, cada cultura tem necessidades específicas de nutrientes e esse cultivo reduz a disponibilidade natural de certos nutrientes, reduzindo a fertilidade do solo e comprometendo a produção em médio prazo. O problema é minimizado por meio da utilização de fertilizantes químicos ou orgânicos e da rotação de culturas.

A região Oeste do Estado do Paraná tem sua economia baseada na produção agrícola de grãos e na safra 2003/04 respondeu por 33% da produção paranaense da soja. As principais culturas desenvolvidas nesta região são a soja, o milho e o trigo que ocupam extensas áreas de produção. Segundo dados do Departamento de Economia Rural, a decisão do produtor em optar pela soja deve-se a: maior estabilidade da cadeia e do mercado, maiores facilitadores para entrega e comercialização do produto e, principalmente, a liquidez constante.

Atualmente o sistema de manejo adotado pela maioria dos agricultores é o plantio direto. O Paraná foi pioneiro na sua adoção. Esse sistema contribui comprovadamente para a diminuição da erosão do solo, melhorando suas características estruturais, o que leva a uma condição mais propícia para o aumento da produtividade agrícola, diminuindo os impactos ambientais.

A Agricultura de Precisão é constituída por um conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado de culturas. Sua principal diferença em relação aos métodos tradicionais de culturas agrícolas é o fato de tratar sempre a área trabalhada como parte de uma variabilidade espacial e até temporal, dos atributos dos solos e das plantas.

Em Agricultura de Precisão a variabilidade espacial dos solos deve ser considerada, pois em se aplicando insumos de modo localizado é possível obter um melhor rendimento com uma economia maior e sem afetar o meio ambiente. As técnicas geoestatísticas fornecem os métodos necessários para a viabilização deste estudo. A geoestatística estuda na Agricultura de Precisão: a estrutura de dependências espaciais e geração, através desta estrutura, de mapas temáticos de atributos de solo e produtividade agrícola.

A melhoria dos índices de produtividade agrícola, o uso racional do solo com respeito ao meio ambiente, o monitoramento do ecossistema são desafios que, para serem devidamente potencializados, exigem um perfeito conhecimento da realidade regional e de sua capacidade de resposta aos desafios da modernização e diversificação da economia.

Por outro lado, a globalização da economia exige que a agricultura brasileira desenvolva tecnologias que possibilitem a competitividade de nossos produtos no mercado mundial através do aumento da produtividade que é comumente obtido pelo aumento do uso de insumos agrícolas. Esses insumos compreendem: insumos biológicos (melhoramento genético das variedades de espécimes cultivadas), insumos mecânicos (mecanização agrícola), quantidade de água (sistemas de irrigação) e insumos químicos (herbicidas, fungicidas, inseticidas, corretivos e fertilizantes). Há ainda o plantio convencional, em que o solo é revolvido com o uso de arado, grade e descompactador, tendo assim sua estrutura física destruída e ficando exposto à erosão, volatilização e lixiviação.

Este trabalho tem como objetivo modelar e apresentar por meio de mapas temáticos a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tais como: densidade do solo (D_s) [mg m^{-3}], microporosidade (Micro) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$], macroporosidade (Macro) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$], porosidade total (Pt) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$] e atributos hídricos do solo tais como condutividade hidráulica (K_{fs}) [cm s^{-1}] e infiltração da água no solo (I) [mm h^{-1}] e da produtividade da soja (Prod) [t ha^{-1}], assim como a correlação espacial dos atributos com a produtividade, com enfoque na Agricultura de Precisão. Buscou-se entender o comportamento dos atributos do espaço físico, ligados à produção agrícola da soja em uma área comercial de 20 ha na região Oeste do Paraná.

REVISÃO DE LITERATURA

A população mundial cresce continuamente, em escala geométrica, em taxas superiores às da oferta de alimentos. Existe, portanto, a necessidade do aumento contínuo da produção agrícola que, para crescer em taxas correspondentes às do crescimento demográfico, requer a aplicação de todos os recursos tecnológicos disponíveis para minimizar os riscos e promover a produção ótima das culturas.

Entre as pesquisas que contribuem para a melhoria do sistema produtivo agrícola, cita-se o estudo da variabilidade espacial em variáveis referenciadas espacialmente, que busca mapear determinados atributos de solo, com vistas a otimizar a utilização de insumos e, conseqüentemente, produzir mais com menor custo.

Segundo REICHARDT (1990), muitos fatores afetam a retenção da água em um solo. “O principal deles é a textura, pois ela, diretamente, determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água e determina as proporções de poros de diferentes tamanhos [...] a velocidade da drenagem depende da condutividade hidráulica do solo”.

HERNANI et al., (1997), ao estudar um Latossolo Roxo, avaliaram as perdas por erosão de água e solo e concluíram que o plantio direto contribui de forma significativa para uma redução na perda de solo e água, além de propiciar maior produção de grãos nas culturas de trigo e soja. Esses resultados reforçam a hipótese de que o plantio convencional apresenta maiores limitações que o plantio direto, tão comum na prática dos agricultores nos primeiros anos do século XX.

Segundo BALASTREIRE (2002), na agricultura tradicional, os levantamentos da fertilidade, da compactação e de outras variáveis do solo, da produtividade de grãos das culturas e dos seus componentes são obtidos sem a preocupação com a variabilidade espacial ou temporal dos dados. Entretanto, esses parâmetros do solo e das culturas variam no espaço e no tempo, dentro de uma mesma lavoura.

KILPP (2002) afirma que o foco da revolução tecnológica está na aplicação do conceito de zonas de manejo, cujo principal objetivo é identificar as causas da variabilidade nos campos de produção e o desenvolvimento de novas práticas de manejo que permitam melhor gerenciamento dos processos de produção.

O princípio básico do uso sustentável do solo é a garantia da manutenção de seu potencial produtivo para as gerações futuras. O ponto de partida é planejar o uso e a ocupação do solo em comum acordo com as características do meio em que está inserido, isto é, de acordo com a sua aptidão, e com a tecnologia recomendada para aquela área (TORRES et al., 2003).

A variabilidade do solo, dentro de um campo de produção, é a causa de muitas outras fontes de variabilidade, além de influenciar diretamente, diversos parâmetros como a disponibilidade de nutrientes, o suprimento de água e as condições relacionadas ao crescimento das raízes das plantas. A textura do solo, por exemplo, está relacionada à sua capacidade de retenção de água. A profundidade de uma camada impermeável determina a profundidade que as raízes das plantas atingirão.

1 DENSIDADE DO SOLO, MICROPOROSIDADE E MACROPOROSIDADE

Segundo KIEHL (1979), a densidade de um determinado tipo de solo, pode ser definida como a relação entre a massa de um solo seco a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros finos (volume ocupado pela massa de solo). A massa do solo contempla as partículas sólidas

e os espaços vazios decorrentes do processo de arranjo estrutural do solo. Por isso a densidade depende da massa, da forma e da distribuição das partículas no solo.

Para NOLLA (1982), a porosidade e a densidade do solo indicam as condições de infiltração de água e ar, pois essas variáveis estão relacionadas ao tamanho e número dos macro e microporos. Os macroporos têm maior capacidade de infiltração de água e ar que os microporos. Por sua vez, quanto maior a densidade do solo, menor será o número dos macroporos e maior o dos microporos, isso determina a capacidade de infiltração do solo.

A densidade do solo é, portanto, um índice do grau de compactação de um solo. Para solos de textura grossa, mais arenosos, as possibilidades de arranjo das partículas não são muito grandes e, por isso, os níveis de compactação também não são grandes. Pelo fato de possuir partículas maiores, o espaço poroso também é constituído, sobretudo, de poros maiores denominados, de modo arbitrário, macroporos; de forma aparentemente paradoxal, nesses solos, o volume total de poros é pequeno.

Para KIEHL (1979), um solo ideal possui uma fração sólida que ocupa 50% do seu volume, sendo a porosidade total igual a 50%, ocupada pela água 25% e 25% pelo ar.

REICHARDT (1990) afirma que os solos cultivados têm menor porcentagem de porosidade quando comparados com os mesmos solos não cultivados. A perda de porosidade está associada à redução do teor de matéria orgânica, à compactação e ao efeito do impacto das gotas de chuva, fatores que, causando uma diminuição no tamanho dos agregados maiores, reduzem, em consequência, o tamanho dos poros. O mesmo autor afirma ainda que a estrutura do solo pode ser mantida ou mesmo melhorada com práticas agrícolas adequadas, tais como: a rotação de culturas, o cultivo apropriado e a incorporação de matéria orgânica no solo.

A porosidade do solo refere-se à proporção de espaços ocupados pelos líquidos e gases em relação ao espaço ocupado pela massa de solo. O volume de poros, em condições médias, representa a metade do volume dessa matéria. Em geral, os solos com texturas mais finas têm maior porosidade, porém, necessitam maiores cuidados na manutenção da aeração; os arenosos têm menor porcentagem de porosidade e uma aeração quase constante.

Entende-se por aeração os processos de troca de gases entre a atmosfera superior e a atmosfera do solo, fatores que muitas vezes podem ser limitantes à produção para a maioria das culturas agrícolas.

No solo a porosidade total é classificada em microporosidade e macroporosidade. A primeira representa a proporção dos poros existentes no solo, responsáveis pela retenção da água, enquanto que a segunda representa a proporção de macroporos, responsáveis pela drenagem e aeração do solo. A porosidade total também é afetada pelo nível de compactação do solo.

Segundo REICHARDT e TIMM (2004), um solo bem agregado (ou estruturado) apresenta boa quantidade de poros de tamanho relativamente grande. Diz-se que possui alta macroporosidade, qualidade que afeta a penetração das raízes, circulação de ar (aeração), manejo do ponto de vista agrícola (operações de cultivo) e a infiltração da água.

2 CONDUCTIVIDADE HIDRÁULICA E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A água é fator fundamental na produção vegetal. Sua falta ou excesso afetam de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas e, por isso, seu manejo racional é imperativo na maximização da produção agrícola.

Qualquer cultura, durante seu ciclo de desenvolvimento, consome enorme volume de água. Cerca de 98% desse volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. O fluxo de água, contudo, é necessário para o desenvolvimento vegetal e por esse motivo sua taxa deve ser mantida dentro de limites ótimos para cada cultura.

O reservatório dessa água é o solo que a armazena, temporariamente, podendo fornecê-la às plantas conforme suas necessidades. Como a recarga natural desse reservatório (chuva) é descontínua, o volume disponível às plantas é variável.

Devido a esses fatores, o manejo correto da água é ponto fundamental em uma agricultura racional.

A condutividade hidráulica do solo foi definida, empiricamente, por Henry Darcy em 1856, identificando-a como a constante de proporcionalidade k , que aparecia nas relações matemáticas resultantes de seus experimentos de infiltração vertical em colunas de areia, completamente saturadas, para a filtração e purificação da água para o abastecimento urbano da cidade de Dijon na França. Atualmente é um dos principais parâmetros utilizados para estudos agrícolas e ambientais que envolvem o fluxo de água no solo, tais como, planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, rebaixamento de lençol freático, movimento de água no interior do perfil do solo, nutrição de plantas, controle de erosão e poluição da água (QUEIROZ; MENDONÇA; SANTOS, 1997; LIBARDI, 2000; RADCLIFFE; RASMUSSEN, 2000).

Segundo BERTONI e LOMBARDI NETO (1990), a condutividade hidráulica é um parâmetro hídrico do solo caracterizado pela facilidade com que a água é conduzida através do solo e, portanto, quanto maior a condutividade hidráulica tanto maior é a facilidade com que a água se move em um solo e, juntamente com outros parâmetros, é de fundamental importância para um bom desenvolvimento da agricultura.

Esses mesmos autores afirmam que a permeabilidade é a capacidade do solo em deixar passar água e ar através do seu perfil e está diretamente ligada ao tamanho, volume e distribuição dos poros e varia nos diferentes tipos de solo. Nos solos arenosos, com grande quantidade de poros, a permeabilidade é rápida, entretanto, nos argilosos, é mais lenta. Para QUEIROZ (1995), a condutividade hidráulica saturada e a porosidade drenável, parâmetros determinantes do movimento da água no solo, apresentam variações espaciais bastantes elevadas em pontos relativamente próximos em uma pequena área, sem causa visível aparente na maioria das situações.

A condutividade hidráulica, também usada para descrever o movimento de água no solo, é um fator muito importante para a disponibilidade de água e está relacionada com a umidade do solo e seu potencial mátrico, além de ser uma boa indicadora da qualidade físico-hídrica, pois se relaciona mais diretamente com o movimento de água no solo (VAN LIER, 2000).

Fatores como sistemas de uso, manejo e erosão, que interferem nas propriedades físicas do solo, também afetam as propriedades hídras e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica. Nesses casos, geralmente ocorre um aumento na densidade do solo e redução da porosidade total, da infiltração e da condutividade hidráulica em relação à condição natural (MELO FILHO, 2002).

A condutividade hidráulica do solo é identificada como uma constante de proporcionalidade k na Equação (1) e é determinada pelas relações matemáticas resultantes de seus experimentos de infiltração de água:

$$q = k.i.A \quad (1)$$

onde:

q : é a vazão ($m^3 s^{-1}$);

k : é a condutividade hidráulica ($m s^{-1}$);

i : é o gradiente hidráulico $\Delta H / L$;

ΔH : é a perda de carga do fluxo (m);

A : é a área da amostra perpendicular ao fluxo (m^2);

L : é o comprimento da amostra (m).

Essa equação também pode ser escrita, substituindo-se o gradiente hidráulico (i) em (1) resultando na Equação (2):

(2)

Existem vários métodos para determinar a condutividade hidráulica de um solo em laboratório ou em campo. Em laboratório é possível atingir um grau de precisão maior do que em campo, entretanto, são desconsideradas as condições naturais de solo.

Um dos métodos conhecidos para determinar a condutividade hidráulica dos solos saturados é o Permeômetro de Carga Constante também conhecido permeômetro de Guelph.

O permeômetro de Guelph é composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante da água. O reservatório de água é formado por um tubo acrílico com régua graduada e um tripé que permite adaptar o aparelho a

terrenos irregulares. Esse permeâmetro foi projetado para medir a condutividade hidráulica entre 10^{-6} cm e s^{-1} 10^{-2} . Para valores que não estejam contidos neste intervalo, os resultados obtidos apresentam erros ou não se consegue realizar o ensaio (AGUIAR, 2001).

O permeâmetro de Guelph, segundo REYNOLDS e ELRICK (1985a, 1986), é utilizado para a medição em campo da zona não saturada da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{fs}) e o potencial de fluxo matricial (ϕ_m), até uma profundidade de 2 m. Esse método mede o fluxo de recarga necessário para manter uma coluna constante de água em um poço cilíndrico construído em cima de um lençol freático. Utilizando o princípio de Mariotte para estabelecer e manter o nível de água e medir a recarga correspondente.

As leituras de fluxo constante, obtidas através do permeâmetro de Guelph em campo, são transformadas em condutividade hidráulica saturada, por meio das Equações (3) e (4), propostas por REYNOLDS e ELRICK (1985b):

$$Q = \left(\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right) k_{fs} + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \phi_m \quad (3)$$

em que:

$$Q = \left(\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right) k_{fs} + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \phi_m \quad (4)$$

sendo:

Q : é a recarga necessária para manter a altura de água (H) constante ($\text{cm}^3\text{min}^{-1}$);

H : é a altura de água no poço (cm);

a : é o raio do poço (cm);

C : é o coeficiente de forma que considera a textura do solo;

k_{fs} : é a condutividade hidráulica do solo saturada (cm s^{-1});

ϕ_m : é o potencial de fluxo matricial ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$);

α : é o gradiente de $\ln k_{fs}$, versus a curva de pressão potencial.

O coeficiente de forma C é obtido por uma representação gráfica desenvolvida por ELRICK et al. (1987), (ANEXO A).

REYNOLDS e ELRICK (1985a) encontraram que os valores de k_{fs} são as médias das condutividades hidráulicas saturadas horizontais e verticais de amostras de solo indeformadas. Para a condutividade hidráulica saturada de campo considera-se que tem um valor aproximadamente igual à metade da condutividade hidráulica saturada verdadeira (BOUWER, 1986).

O processo de infiltração em um solo não saturado é um processo tridimensional que deve alcançar o fluxo permanente rapidamente e dentro da região úmida. Em um permeâmetro de carga constante o fluxo é exterior ao poço e se assume que é permanente. O solo ao redor deste poço é uniforme, isotrópico, saturado e poroso (XIANG, 1994).

Habitualmente a condutividade hidráulica medida em campo é menor que a condutividade hidráulica medida em laboratório, pois nele existem bolhas de ar, as quais caem no solo quando saturado, devido aos processos de infiltração (DAFONTE et al., 1999).

Os mesmos autores afirmam que a condutividade hidráulica medida em campo é mais apropriada que a condutividade hidráulica saturada para a simulação dos processos de infiltração, pois representa mais fielmente as condições de umidade em campo.

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo saturado (Q) na Equação (3), são utilizadas duas cargas hidráulicas seguidas, para se obter deste modo duas equações simultâneas, apresentadas nas Equações (5) e (6):

$$Q_1 = \left(\frac{2\pi H_1^2}{C_1} + \pi a^2 \right) K_{fs} + \left(\frac{2\pi H_1}{C_1} \right) \phi_m \quad (5)$$

$$Q_2 = \left(\frac{2\pi H_2^2}{C_2} + \pi a^2 \right) K_{fs} + \left(\frac{2\pi H_2}{C_2} \right) \phi_m \quad (6)$$

onde:

H_1 : é a profundidade da primeira coluna de água (cm);

H_2 : é a profundidade da segunda coluna de água (cm);

a : é o raio do poço (cm);

k_{fs} : é a condutividade hidráulica do solo saturada (cm s^{-1});

ϕ_m : é o fluxo matricial ($\text{cm}^3\text{min}^{-1}$);

C_1 e C_2 são os fatores correspondentes à relação (H_1/a) e (H_2/a) e são obtidos pela representação gráfica C versus H/a , desenvolvida por ELRICK *et al.* (1987), (ANEXO A).

Um dos parâmetros necessários para o cálculo da condutividade hidráulica saturada de campo é C que é um coeficiente adimensional dependente do raio do poço, da carga hidráulica e da variação de ϕ_m em profundidade e com a componente radial. Para esse cálculo REYNOLDS *et al.*, (1987), desenvolveram três grupos de curvas para calcular esse fator em função da relação (H/a) . Os três grupos são: solos arenosos, solos franco-argilosos estruturados e solos argilosos não-estruturados; as curvas parecem compensar adequadamente e desprezar as equações das interações gravidade/capilaridade.

Resolvendo-se o sistema das Equações (5) e (6), obtêm-se os respectivos valores de k_{fs} e ϕ_m .

Outra forma de determinação para condutividade hidráulica saturada (Q) em campo utiliza um método semi-analítico e numérico proposto por REYNOLDS, ELRICK e TOPP (1983). A aplicação desse método deve considerar:

- Meio poroso rígido, homogêneo e isotrópico;
- Fluxo em regime permanente;
- Domínio de fluxo em um semi-espaço infinito.

A condutividade hidráulica do solo saturado (k_{fs}) será obtida pela Equação (7):

$$\dots \quad (7)$$

em que:

(8)

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (9)$$

$$Q_1 = (X)R_1 \text{ ou } Q_1 = (Y)R_1 \quad (10)$$

$$Q_2 = (X)R_2 \text{ ou } Q_2 = (Y)R_2 \quad (11)$$

onde:

X : é a área do reservatório combinado (cm²);

Y : é a área do reservatório interno (cm²);

R_1 : é a razão entre a leitura constante obtida no permeâmetro e o intervalo de tempo, para H_1 ;

R_2 : é a razão entre a leitura constante obtida no permeâmetro e o intervalo de tempo, para H_2 .

Quando os solos são considerados heterogêneos, com grandes vazios e quando são utilizadas mais de uma carga de pressão, é comum a condutividade hidráulica apresentar valores negativos. Para evitar que os valores sejam negativos no cálculo de k_{fs} e ϕ_m , ELRICK; REYNOLDS e TAN. (1989) propuseram um ensaio que utiliza apenas uma carga de pressão, como apresentado na Equação (12):

$$k_{fs} = \frac{CQ_s}{\left[2\pi H^2 + C\pi a^2 + \left(\frac{2\pi H}{\alpha^*} \right) \right]} \quad (12)$$

onde:

α^* : é o parâmetro de acordo com o tamanho dos poros, valor tabelado, (Tabela 1);

ϕ_m : é o fluxo matricial (cm² s⁻¹);

O termo $\left(\frac{2\pi H}{\alpha^*}\right)$ está relacionado com a capilaridade e quanto menor for H , menor será a influência de α^* .

O valor de α^* obtido por inclusão do solo dentro de uma das quatro categorias de meios porosos é apresentado na Tabela 1. A Equação (12) necessita somente de uma carga hidráulica para a obtenção de k_{fs} e ϕ_m .

Segundo REICHARDT e TIMM (2004), a condutividade não depende apenas da porosidade total, mas, em especial, das dimensões dos poros e da atividade das argilas que os formam. Por exemplo, um solo arenoso, em geral, tem condutividade hidráulica maior do que um argiloso, apesar do primeiro ter porosidade total menor que o último.

A água chega à superfície do solo (ou às culturas agrícolas), sobretudo pelos processos de precipitação pluvial e irrigação. De menor importância (do ponto de vista quantitativo) são o granizo e o orvalho e, pelo menos em regiões tropicais e subtropicais, a neve. Essa água que entra em contato com as plantas e com o solo é, principalmente, absorvida pelo solo. O processo pelo qual a água penetra pela superfície do solo é denominado infiltração.

TABELA 1 - Categoria de meios porosos usados para a estimação de α^*

CATEGORIA MEIO POROSO	α^* (m ⁻¹)
Materiais argilosos compactados e pouco estruturados	1
Solos com textura fina e não estruturados	4
Argilas, areias finas e grossas estruturadas	12
Solos com grãos graúdos e solos estruturados com fissuras e macroporos.	36

FONTE: REYNOLDS; VIEIRA; TOPP (1991).

NOLLA (1982) afirma que as variações de velocidade de infiltração no solo são influenciadas pela macroporosidade, matéria orgânica e compactação do solo, pois, quanto maior o teor de matéria orgânica maior a permeabilidade,

portanto, influenciando a estrutura, porosidade, capacidade de retenção de água e a temperatura do solo.

Segundo RESENDE e SCALOPPI (1985), a infiltração é um fenômeno complexo, que depende de inúmeras variáveis relacionadas às características físicas e morfológicas do solo.

A infiltração da água no solo tridimensionalmente, a qual representa a permeabilidade do solo definida por REICHARDT (1985), foi obtida por meio do fluxo constante do permeâmetro com carga hidráulica de 10 cm, dada pela Equação (13):

$$I = \frac{Q^*}{D_p} \left(\frac{D_p^2}{4H_2} - \frac{D_0^2}{4H_2} \right) \quad (13)$$

onde:

I : é a infiltração da água no solo (mm h^{-1});

D_p : é o diâmetro do reservatório do permeâmetro (cm);

D_0 : é o diâmetro do orifício (cm);

H_2 : é a segunda carga hidráulica utilizada na leitura de fluxo (10 cm);

Q^* : é o fluxo constante (mm min^{-1}).

3 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DO SOLO

Uma das causas das variações do solo decorre das diversas atuações do homem durante o cultivo de lavouras. A distribuição radicular e da parte aérea das plantas depende das propriedades do solo, das operações de plantio, de pragas e de doenças. Assim, medidas de parâmetros do solo e da planta, muitas vezes, apresentam irregularidades que podem ou não estar distribuídas ao acaso em relação à sua distribuição espacial no campo. Os pesquisadores têm procurado alcançar esses objetivos por meio das mais diversas técnicas estatísticas, aplicadas sobre dados obtidos, não considerando a sua distribuição espacial em campo.

A Agricultura de Precisão pressupõe a elaboração e utilização de mapas que descrevam as características e atributos de uma área. Eles representam espacialmente a variabilidade dos atributos do solo, produtividade e características da cultura observadas em campo. Com base nessas informações são tomadas as decisões que envolvem o manejo localizado das áreas. Dessa forma, torna-se essencial que a escolha dos métodos para geração dos mapas seja feita com base em critérios bem estabelecidos.

GONÇALVES, CERETA e BASSO (2000) afirmam que uma alta variabilidade de propriedades físicas do solo implica uma alta variabilidade nas características de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica. O estudo dessas propriedades é importante quando se busca obter conhecimento e controle da dinâmica da água no solo.

Porém, conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo ou de qualquer outra variável não é suficiente, pois é preciso também modelar e até mesmo correlacionar esses atributos com a produtividade, sendo estas etapas as mais importantes para o estabelecimento de um processo de gerenciamento localizado (JOHANN et al., 2002).

O conhecimento da variabilidade espacial e temporal de atributos do solo é ferramenta importante no contexto da Agricultura de Precisão. A abordagem geoestatística permite a análise de estruturas espaciais de variáveis, isoladamente ou em conjunto. (VENDRUSCULO et al., 2002).

Para MERCANTE, OPAZO e SOUZA (2003), a variabilidade espacial dos solos não tem sido devidamente considerada nos processos produtivos da agricultura. Um maior conhecimento da variabilidade espacial da produtividade e das propriedades físicas do solo, bem como o estudo dessa variabilidade, com o passar dos anos (variabilidade temporal), vem somar com o conhecimento já existente sobre o assunto, o qual, ao ser devidamente disponibilizado aos produtores que adotam a técnica de agricultura de precisão, pode viabilizar uma agricultura moderna e economicamente competitiva.

Segundo RIBEIRO JUNIOR (1995), a variabilidade espacial é característica de muitos fenômenos naturais e, entre eles, incluem-se os atributos físicos do solo. Dentro da modelagem estocástica para tais problemas, situa-se um conjunto de técnicas ao qual se convencionou chamar de Geoestatística.

Medidas de parâmetros do solo e da planta apresentam, muitas vezes, irregularidades que podem ou não estar distribuídas ao acaso em relação à sua distribuição espacial no campo. Portanto, é importante estabelecer critérios para definir espaçamento entre medidas a serem feitas, para definir a frequência de observações e o número necessário de observações para que o valor médio obtido caracterize o local considerado.

LEGENDRE (1993) comenta que, quando a autocorrelação se mostra presente nos dados, são possíveis dois enfoques: o primeiro consiste em remover a dependência espacial, excluindo amostras ou filtrando a estrutura espacial de alguma forma. A alternativa é considerar um método de análise estatística que leve em conta a autocorrelação espacial. Esta segunda abordagem é preferível, quando tal método é disponível e, especialmente, em casos em que a estrutura espacial é parte importante do processo em estudo.

Dentre os atributos do solo, seguramente, a condutividade hidráulica está entre os que apresentam maior índice de variabilidade. Na medida em que ocorre no espaço livre do solo, a condutividade hidráulica é influenciada por todas as propriedades que afetam a distribuição, o tamanho e a forma dos poros. Assim, atributos do solo como a textura, a estrutura, a densidade, qualidade das argilas e a matéria orgânica exercem influência sobre a sua condutividade hidráulica. Outro fator importante que afeta a condutividade hidráulica é a umidade do solo (REICHARDT, 1996; LIBARDI, 2000).

4 PRODUTIVIDADE DA SOJA

Segundo ANTUNES (2004), o manejo correto da soja pode resultar em rendimentos de até 7 t ha^{-1} , contudo a produtividade média nas lavouras brasileiras se mantém em $2,8 \text{ t ha}^{-1}$. Nas últimas quatro décadas, as técnicas de melhoramento da cultura têm resultado num crescimento de $0,025 \text{ t ha}^{-1}$ ao ano, um rendimento que depende tanto de pesquisas quanto do ambiente. O autor ressalta que o principal papel da pesquisa é desenvolver cultivares com boa produtividade de grãos, de ampla adaptação e que apresentem estabilidade na produção.

Segundo KILPP (2002), na identificação das causas da variabilidade sobre a produção em um talhão, os mapas devem ser utilizados numa primeira etapa para estabelecer as razões óbvias dos fatores limitantes da produtividade. Em uma segunda etapa, as propriedades físicas do solo devem ser analisadas, para explicar a variabilidade encontrada nos mapas, entre elas a compactação, a deficiência na drenagem e a estrutura do solo.

Para ABREU (2000), a tendência para o maior rendimento de grãos da soja em sistema de plantio direto deve-se às propriedades hídricas, infiltração de água, condutividade hidráulica e à manutenção da cobertura do solo, mantendo-se assim uma maior umidade do solo.

Trabalhos sobre a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo e da produtividade foram desenvolvidos na Região Oeste do Paraná, dentre eles citam-se: SOUZA et al. (1999), SILVA et al. (2003), MERCANTE OPAZO e SOUZA (2003), JOHANN et al. (2002) e JOHANN et al. (2004). Além da variabilidade espacial dos atributos físicos e da produtividade, MUCELIM (2004) e MILANI (2005) também estudaram as propriedades hídricas do solo.

5 GEOESTATÍSTICA

Para VIEIRA et al. (1983), quando uma determinada propriedade varia de um local a outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através de dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar à Geoestatística.

A Geoestatística pode ser definida como um conjunto de técnicas para o estudo de variáveis localizadas em uma determinada região, com o objetivo de encontrar um modelo para a estrutura de variabilidade espacial de uma variável de interesse.

A utilização da Geoestatística no gerenciamento de projetos agrícolas desempenha um papel relevante, pois ao associar informações de atributos físico-químicos e hídricos do solo com relevo, clima, produção, pode-se obter um melhor rendimento na produção das culturas, minimizando os impactos

$m(x)$: é uma função determinística que descreve a componente estrutural de Z em x (constante ou função de x);

$\delta(x)$: é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de $m(x)$;

$\eta(x)$: é um ruído aleatório não-correlacionado (erro experimental) de ocorrência pontual.

Para VIEIRA (1996), com uma única amostragem por ponto, obtém-se uma única realização da função aleatória $Z(x_i)$. Para estimar valores locais não amostrados é necessário introduzir a restrição de que a função aleatória é estacionária, se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i + h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h de constantes positivas que pertença a R ou R^2 .

Existem duas hipóteses de estacionaridade de uma função aleatória $Z(x_i)$, que são: hipótese de estacionaridade de segunda ordem e a hipótese intrínseca. Na primeira hipótese a função aleatória $Z(x_i)$ tem esperança constante e a variância existe. Já a segunda hipótese de estacionaridade intrínseca considera que a esperança é constante e a covariância entre $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ é uma função que depende de h .

Uma função aleatória $Z(x_i)$ é intrinsecamente estacionária se:

a) A esperança $E[Z(x_i)] = m$, para todo x_i em $S \subset R$ ou $S \subset R^2$;

b) A covariância $\gamma(h)$;

c) A variância da diferença de $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ é

$$Var[Z(x_i) - Z(x_i + h)] = E\{[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2\}, \text{ para todo } h, \text{ isto é, o}$$

incremento h tem variância finita, e não depende de x_i para qualquer vetor h .

Para se conhecer em qual tipo de estacionaridade os dados de determinado estudo se enquadram, não existe um método simples. O

semivariograma é a principal técnica utilizada para se conhecer indiretamente a estacionaridade dos dados (VIEIRA, 1996).

5.2 Semivariograma

A dependência espacial pode ser estudada por meio de um gráfico denominado semivariograma.

Na análise estrutural da dependência espacial entre amostras vizinhas a geoestatística utiliza o semivariograma que tenta ser capaz de extrair uma imagem da variabilidade dos dados disponíveis, das medidas de correlação existentes entre valores tomados em dois pontos no espaço e do raio de dependência entre as amostras.

O semivariograma experimental é um gráfico que é construído através da função semivariância $\gamma(h)$ versus cada valor h .

Segundo CRESSIE (1993), a semivariância $\gamma(h)$ é definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor h , apresentados na Equação (15):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (15)$$

A semivariância pode ser estimada pelo método dos momentos da Equação (16), denominada de semivariograma de Matheron, que tem a forma:

$$\hat{\gamma}(h) = (2N(h))^{-1} \sum_{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (16)$$

onde:

$\hat{\gamma}(h)$: é a semivariância estimada;

$N(h)$: é o número de pares de valores observados, $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$, separados pela distância h ;

$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$: são valores da i -ésima observação da função aleatória, coletadas nos pontos i , separados pelo vetor h .

O estimador apresentado na Equação (16), também conhecido como estimador clássico ou estimador de Matheron, é muito utilizado em estudos de geoestatística.

RIBEIRO JUNIOR (1995) afirma que o estimador de Matheron é pouco resistente e muito afetado por observações atípicas (*outliers*), sobretudo as que produzem distribuições de caudas pesadas (assimétricas leptocúrticas). Nesses casos surge a necessidade de um estimador que não seja afetado por pontos discrepantes e que não possam ser eliminados ou substituídos.

GRESSIE e HAWKINS (1980) apresentam um estimador de semivariância, dado pela Equação (17):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \frac{\left[N(h)^{-1} \sum_{N(h)} \sqrt{|Z(x_i + h) - Z(x_i)|} \right]^4}{0,457 + \frac{0,494}{N(h)}} \quad (17)$$

O semivariograma experimental pode ser definido como uma ferramenta geoestatística utilizada para determinar o grau de dependência espacial entre dados amostrais, distribuídos segundo um sistema espacial de referência, para se obter os pontos necessários à construção de mapas de isolinhas através da interpolação por krigagem.

Para valores de uma vizinhança próxima de um ponto x de referência, a diferença média entre os valores tende a ser pequena. À medida que este ponto diminui, afastando se do ponto de referência, as diferenças médias entre os valores tendem a aumentar, podendo se estabilizar a partir de certa distância, como se pode observar na Figura 1.

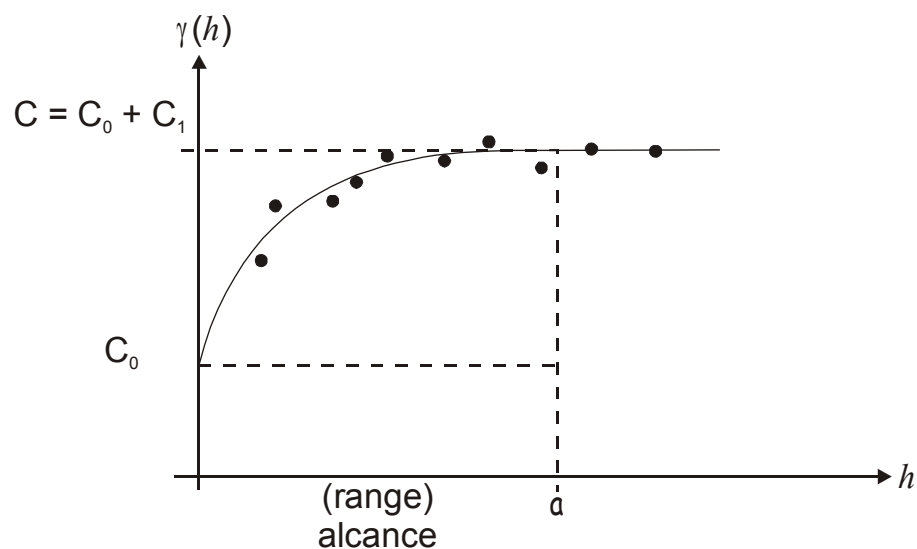


Figura 1 - Semivariograma experimental

Na Figura 1 observam-se os seguintes parâmetros:

- **Alcance** (a): distância dentro da qual as amostras apresentam dependência espacial;

- **Patamar** (C): valor pelo qual a semivariância $\gamma(h)$ se estabiliza e a distância h correspondente é o alcance (a). A partir desse ponto considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, pois a variância da diferença entre os pares de amostras ($VAR[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$) não apresenta variações com a distância;

- **Efeito Pepita** (C_0): revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre os pontos das amostras.

Os parâmetros do semivariograma: patamar (C); alcance (a) e o efeito pepita (C_0) buscam quantificar o grau de dependência espacial existente entre os dados amostrais dos atributos em estudo.

Segundo VIEIRA (1996), dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para valores altos de h , os modelos podem ser classificados em modelos com patamar, comumente denominado *Sill*, e os modelos sem patamar.

Além do semivariograma experimental a ser usado, é necessário que se escolha o *cutoff* (ponto de corte) ideal a ser usado, ou seja, a distância máxima utilizada no cálculo da semivariância. Geralmente usam-se valores de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{2}$, da distância máxima, pois, após esses valores, o semivariograma poderá perder seu sentido (CLARK 1979; GUERRA, 1988). Mas nada impede que seja usado o *cutoff* entre eles, desde que se tenha bom senso nesta escolha. Também é necessária a escolha de h (*lag*), para os quais as semivariâncias serão calculadas. Os ângulos mais utilizados para os semivariogramas direcionais são 0° , 45° , 90° e 135° . Tanto para h quanto para o ângulo, são necessários intervalos de abrangência. A distância h depende

muito do tamanho da área experimental em estudo e do *cutoff* escolhido, porém, quanto ao ângulo, propõe-se uma tolerância de 40° (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Existem alguns modelos de ajuste adequados descritos na literatura que têm atendido a contento as necessidades de modelagem de semivariogramas. Alguns modelos básicos, usuais em geoestatística para ajuste são mencionados a seguir:

5.2.1 Modelos com patamar

a) Modelo linear com patamar

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C_1}{a} h, & 0 < h < a \\ C_0 + C_1, & h > 0 \end{cases} \quad (18)$$

em que:

C_1/a é o coeficiente angular para $0 < h < a$.

Para esse modelo, o patamar é determinado por inspeção. O coeficiente angular é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, atribuindo maior peso aos pontos que correspondem a maior número de pares. O efeito pepita C_0 é obtido pela intersecção da reta no eixo $\gamma(h)$. O alcance a e o valor de h correspondem ao cruzamento da reta inicial com o patamar. É utilizado para $S \subset R$

b) Modelo esférico

O modelo esférico apresenta uma estrutura de correlação espacial que aumenta com a distância até certo ponto (alcance), a partir do qual a

semivariância se torna constante, limitando desta forma a influência de cada amostra (PANNATIER, 1996).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C_1 & , h \geq a \end{cases} \quad (19)$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se valores do efeito pepita (C_0) e do patamar (C), traçando-se uma reta que passe pelo eixo $\gamma(h)$ em C_0 e que seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância $h = (2/3)$ de a , desse modo, o alcance será $a = (3/2)h$. O modelo esférico é linear até, aproximadamente, $(1/3) a$ (VIEIRA et al, 1983). É utilizado para $S \subset R$, R^2 ou R^3 .

c) Modelo exponencial

Outro modelo utilizado é o modelo exponencial, o qual é dado pela equação:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right], \quad 0 < h < d \quad (20)$$

em que: d : é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que no modelo esférico atinge o valor do alcance (a). Esse parâmetro é determinado visualmente como a distância, após a qual o semivariograma se estabiliza. Definido para, $S \subset R$, R^2 e R^3 .

d) Modelo gaussiano

O modelo Gaussiano é considerado um modelo transitivo, utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right], \quad 0 < h < d \quad (21)$$

Os parâmetros C_0 e C_1 para o modelo gaussiano são determinados da mesma forma que o esférico. Utilizado para $S \subset R, R^2$ e R^3 .

Os principais modelos classificados em modelos com patamar estão representados na Figura 2.

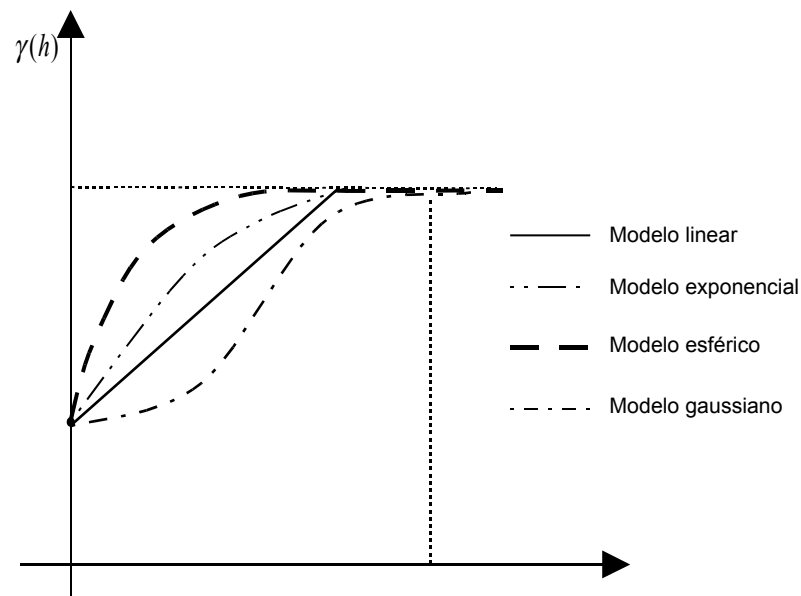


Figura 2 - Representação gráfica de semivariogramas experimentais de modelos teóricos com patamar

5.2.2 Modelos sem patamar

Segundo VIEIRA (1996) e STURARO (1995), os modelos sem patamar correspondem a fenômenos que têm uma capacidade infinita de dispersão e, portanto, não têm variância finita e a covariância não pode ser definida. Esses modelos podem ser escritos na forma da Equação (22):

$$\gamma(h) = C_0 + \alpha h^\beta, \quad 0 < \beta < 2; h \neq 0 \quad (22)$$

O parâmetro α representa o coeficiente de declividade do modelo. β é o expoente e tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, para garantir que o semivariograma tenha positividade definida condicional.

Esses modelos são generalizados como modelos lineares e estão representados na Figura 3.

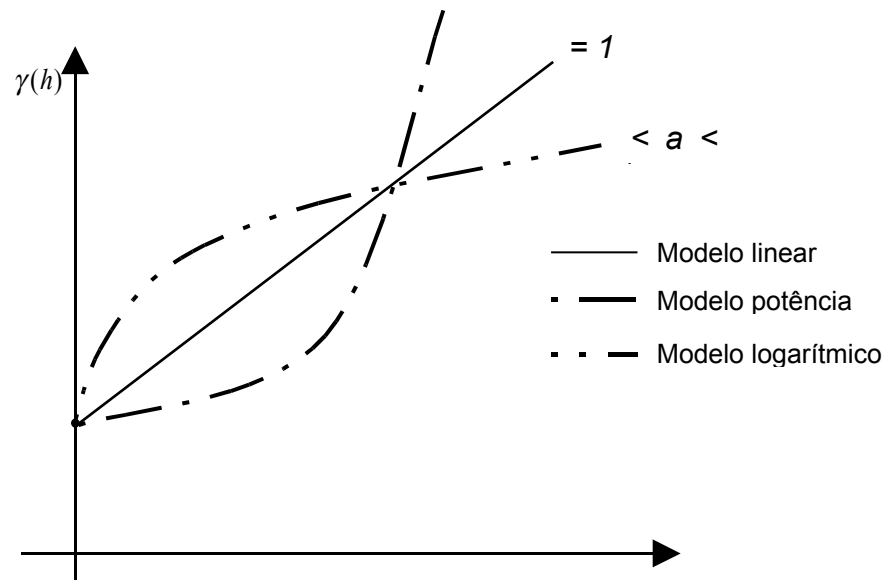


Figura 3 - Representação gráfica dos modelos potência, linear e logaritmo com efeito pepita

5.3 krigagem Ordinária

Krigagem é um método de interpolação sem tendência e com variância mínima que é aplicado quando há dependência espacial entre amostras, detectada pelo semivariograma da variável. Tal interpolação visa obter valores para a variável em pontos não-amostrados, para a construção de mapas de isolinhas ou superfície (CRESSIE, 1993).

O estimador da interpolação por krigagem pode ser obtido supondo-se que: estimando valores \hat{Z} para qualquer local, x_0 , em que não se tenham valores medidos, essa estimativa deve ser uma combinação linear dos valores medidos, representada pela Equação (23).

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i); \quad (23)$$

sujeito a $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$, onde:

N: número de valores medidos $Z(x_i)$ envolvidos na estimativa;

λ_i : pesos associados a cada valor $Z(x_i)$ medido, condicionado à não-tendenciosidade e variância mínima.

5.4 Semivariograma Cruzado

Quando se têm duas funções aleatórias medidas na mesma área, com parte dos pontos de amostragem ou todos coincidentes, pode-se avaliar o grau de semelhança da variação das duas no espaço, através do Semivariograma Cruzado.

Dadas duas funções aleatórias z_1 e z_2 , elas poderão ser positivamente correlacionadas, negativamente correlacionadas ou não

correlacionadas espacialmente. Duas funções aleatórias são positivamente correlacionadas se altos valores de uma função correspondem a altos valores de outra e baixos valores de uma função aleatória correspondem a baixos valores de outra função. Duas funções aleatórias são negativamente correlacionadas se altos valores de uma função correspondem a baixos valores de outra e baixos valores de uma função correspondem a altos valores de outra. Duas funções aleatórias são isentas de correlação quando o aumento ou diminuição de uma função aleatória não aparenta fazer efeito sobre a outra. (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; e LOPES, 1999)

Para VIEIRA (1996), no caso do semivariograma cruzado, o alcance representa a distância máxima de dependência espacial entre as duas variáveis em estudo; o patamar, se existir, deve aproximar-se do valor da covariância entre as duas funções aleatórias. Quando as duas funções aleatórias apresentarem uma correlação inversa, a covariância será negativa e o semivariograma cruzado também será negativo. Este mesmo autor afirma que os modelos utilizados para o semivariograma cruzado são os mesmos já requeridos para o semivariograma.

Segundo GONÇALVES (1997), duas funções aleatórias, como por exemplo, Matéria Orgânica e Produtividade, podem se apresentar intercorrelacionadas espacialmente. O semivariograma cruzado dado pela Equação (24) pode ilustrar esta correlação, estabelecendo um possível vínculo entre elas:

$$\hat{\gamma}(h)_{1,2} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(s_i) - Z_1(s_i + h)][Z_2(s_i) - Z_2(s_i + h)] \quad (24)$$

onde: $Z_1(.)$ representa uma função aleatória em estudo numa dada localização e $Z_2(.)$ representa a segunda função aleatória na mesma posição.

Outra forma de se verificar a correlação existente entre duas funções aleatórias z_1 e z_2 é através do coeficiente de correlação linear de Pearson γ que é definido como na Equação (25):

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{1i} - \bar{z}_1)(z_{2i} - \bar{z}_2)}{S_{z_1} S_{z_2}} \quad (25)$$

onde:

n : é o número de dados;

\bar{z}_1 ; é média da primeira função aleatória;

\bar{z}_2 ; é média da segunda função aleatória;

S_{z_1} : é o desvio padrão da primeira função aleatória;

S_{z_2} : é o desvio padrão da segunda função aleatória;

O numerador da equação acima é a covariância entre as funções aleatórias z_1 e z_2 , é dependente da magnitude dos dados, assim, ao dividi-lo pelos desvios padrão das duas variáveis, o coeficiente de correlação γ estará entre -1 e 1 e será independente da magnitude dos dados (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Quanto mais γ se aproximar de -1, mais negativa será a correlação, assim como quanto mais γ se aproximar de 1, mais positivamente os dados estão correlacionados. Da mesma forma, quanto mais próximo de zero estiver γ , menor será a correlação linear entre as funções aleatórias.

Segundo ISAAKS e SRIVASTAVA (1989), a estatística γ mostra a existência ou não de relação linear entre as duas variáveis, porém, se esta não for linear, o coeficiente de correlação será baixo e este coeficiente poderá mascarar os resultados. O coeficiente de correlação de Pearson não considera a localização espacial, assim, a existência de correlação espacial pode ser estudada através de semivariogramas cruzados. A correlação não paramétrica de Spearman também não considera a localização espacial dos dados.

MATERIAL E MÉTODOS

1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA ESTUDADA

Esta pesquisa foi desenvolvida na região Oeste do Estado do Paraná em uma área de 20 ha, localizada no Centro de Pesquisa Eloy Gomes da Cooperativa Central Agropecuária de Desenvolvimento Tecnológico e Econômico Ltda. - COODETEC, na BR 467, Km 98, Cascavel. As coordenadas geográficas são 53°26' W e 24°56' S. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico.

A região localizada no Oeste do Estado do Paraná apresenta relevo suave ondulado e clima, classificado segundo o sistema Köppen, como Cfa, isto é, subtropical úmido, sem estiagem típica.

As culturas desenvolvidas nessa área, nos últimos anos, têm sido: no verão a soja e o milho e no inverno o trigo.

O levantamento topográfico, bem como o posicionamento dos locais de amostragem de solo, foram feitos por meio de receptores GPS, por meio do método estático com correção diferencial pós-processada (DGPS estático).

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa maior que é desenvolvido pelo Laboratório de Estatística Aplicada (LEA) da Unioeste, Campus de Cascavel.

2 AMOSTRAGEM

Foram utilizados 116 pontos georeferenciados com espaçamento médio de 50 metros entre parcelas. A área em estudo pode ser visualizada através da Figura 4. Os pontos correspondem às parcelas amostradas.

A pesquisa foi desenvolvida na cultura da soja, cujo sistema de manejo adotado foi o plantio direto. A área foi dividida em três cultivares diferentes e foram utilizadas três variedades de sementes diferentes da COODETEC: CD201, CD215 e CD211. A variedade CD201 que possui um ciclo médio de 130 dias, a variedade CD215 com um ciclo médio de 120 dias e a variedade CD211 que possui um ciclo médio de 160 dias.

Nesses três cultivares, o plantio da soja ocorreu entre os dias 24 e 29 de outubro de 2003 e a amostragem dos atributos hídricos foi efetuada no período de 4 a 8 de janeiro de 2004. A colheita da soja para a avaliação do rendimento de grãos foi realizada em março de 2004.

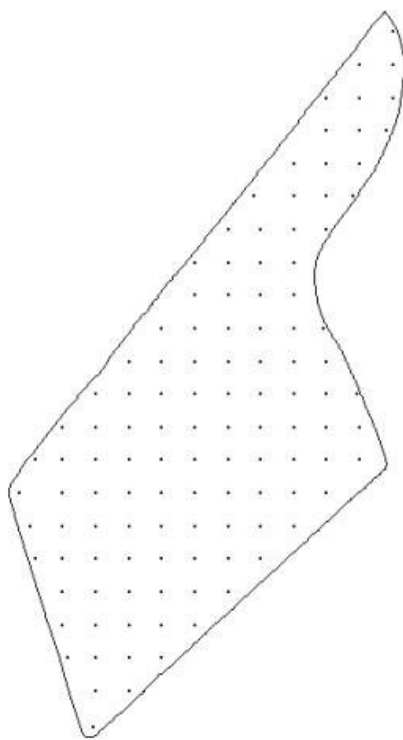


Figura 4 - Esquema amostral da área do experimento

Na área estudada, foram coletados dados amostrais das variáveis: densidade do solo, macroporosidade e microporosidade nas profundidades 0 - 10 e 10 - 20 cm, condutividade hidráulica saturada do solo, infiltração de água no solo e produtividade da soja.

3 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DOS DADOS

3.1 Densidade, Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total do Solo

Foram coletadas duas amostras em duas profundidades em cada parcela. Para as variáveis hídricas (condutividade hidráulica e infiltração da água no solo) foi utilizada a metodologia proposta por REYNOLDS, ELRICK e TOPP (1983). A obtenção dos dados dos atributos físicos (densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo) segue os procedimentos recomendados pela EMBRAPA (1999), chamado de método do anel volumétrico.

Em campo, os anéis volumétricos foram cravados no solo em uma profundidade de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Em seguida, as amostras foram preparadas em laboratório para serem saturadas por um período de 24 horas em água e, levados à mesa de tensão, equilibrados a 60 cm de coluna de água por mais 24 horas e depois de medidas suas massas em balança de precisão foram colocadas em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas. Após o resfriamento das amostras foi realizada nova medição das massas.

Procedeu-se então o cálculo das variáveis: densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo.

As formas mais comuns de se quantificar a compactação do solo são através da massa específica global ou, simplesmente, densidade e através da porosidade total. A densidade de um solo é definida pela relação diretamente proporcional entre a massa de uma amostra de solo sem água e inversamente proporcional ao volume que ela ocupa, na condição natural, isto é, sem destruir sua estrutura.

Para o cálculo da densidade do solo (D_s) foi utilizada a Equação (26):

$$D_s = \frac{M_s}{M_u} \quad (26)$$

onde:

Ds: densidade do solo em mg m^{-3} ;

Ms: massa de solo seco em mg;

Mu : volume total do solo em m^3 .

A densidade de partícula foi obtida através dos procedimentos descritos no manual da EMBRAPA (1999).

Para o cálculo da microporosidade, macroporosidade e porosidade total foram utilizadas as Equações (27), (28) e (29), respectivamente:

$$\text{---} \quad (27)$$

$$\text{---} \quad (28)$$

$$\text{---} \quad (29)$$

onde:

Pt: porosidade total em $\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$;

Dp: densidade de partículas em mg m^{-3} ;

Micro : microporosidade em $\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$;

Macro : macroporosidade em $\text{dm}^3\text{dm}^{-3}$.

3.2 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado e Infiltração da Água no Solo

A condutividade hidráulica do solo saturado e a infiltração da água no solo foram obtidas por meio da análise feita com as leituras de fluxo coletadas com a utilização do permeâmetro de carga constante ou permeâmetro de Guelph que foi construído para este experimento através da metodologia descrita por ELRICK et al., (1987) é apresentado na Seção 2.2.

Em campo, foram perfurados poços com trado apropriado de 15 cm de profundidade e 6 cm de diâmetro. Foram fixadas colunas de água nas alturas 5 e 10 cm para a obtenção das leituras de fluxo. As leituras de fluxo foram realizadas em intervalos de tempos iguais até que fossem obtidas leituras aproximadamente constantes, como descrito por REYNOLDS e ELRICK (1985b). Os procedimentos de campo podem ser vistos nas Figuras (5) e (6).

A condutividade hidráulica de solo saturado foi calculada utilizando-se a metodologia proposta por REYNOLDS e TOPP (1983), já definida. A infiltração da água no solo foi obtida por meio da Equação (13).



Figura 5 - Permeâmetro de Guelph



Figura 6 - Poço construído para obtenção das leituras de fluxo

3.3 Produtividade da Soja

Para a obtenção de dados para a produtividade da soja [$t\ ha^{-1}$], foram retiradas amostras de $1\ m^2$ de soja em cada parcela, feita a triagem e em seguida mensurada suas massas com a utilização de balança de precisão, também foi verificada a umidade para cada amostra. A umidade de correção para a produtividade considerada foi de 13%.

4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram analisados estatisticamente através de uma análise exploratória, tendo por base os pressupostos teóricos de GOMES (1987). As estatísticas e métodos utilizados nas análises foram: diagrama de dispersão, medidas de posição, medidas de dispersão, medidas de formas; gráfico *boxplot* para identificar pontos discrepantes. Os testes de normalidade utilizados foram de Shapiro-Wilks (1965) e Kolmogorov-Smirnov.

Gráficos *post plot* foram construídos para identificar tendências direcionais e gráficos de média *versus* desvio padrão para verificar a estacionaridade.

Para as análises dos atributos em estudo foram utilizados métodos geoestatísticos tais como: semivariogramas e envelopes para a verificação da estrutura de dependência espacial e construção de mapas temáticos através da krigagem ordinária. Para a verificação da correlação espacial dos atributos físicos e hídricos estudados com a produtividade da soja foram construídos semivariogramas cruzados e os coeficientes de correlação linear de Pearson e não paramétrico de Spearman.

Nas análises estatísticas foram utilizados os softwares MINITAB 13.0, VARIOWIN 2.2 (PANNATIER, 1996), SURFER 6.0 (SMITH, 1997), IDRISI 3.2 (EASTMAN, 1999), GS+, GEOCAC (SILVA et al., 2003) e GeoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGLLE, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 ANÁLISE DESCRITIVA, INFERÊNCIAS CLÁSSICAS E ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL

1.1 Análise Descritiva e Inferências Clássicas dos Atributos Físicos do Solo

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos nas análises descritivas para os atributos: densidade de solo (D_s) [mg m^{-3}]; porosidade total (P_t) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$]; microporosidade (Micro) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$] e; macroporosidade (Macro) [$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$], em uma área comercial de 20 ha para o sistema de manejo de plantio direto, em um latossolo vermelho distroférico na região Oeste do Paraná para o cultivo da soja.

TABELA 2 - Análise exploratória dos atributos físicos do solo em estudo na profundidade 0 - 10 cm

Atributo	D_s (mg m^{-3})	Micro ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)	Macro ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)	P_t ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
N° pontos	112	112	112	112
Média	1,12	38,64	17,76	56,40
Mínimo	0,84	12,94	4,62	43,63
1° Quartil	1,02	36,39	12,83	52,26
Mediana	1,12	38,32	18,34	56,44
3° Quartil	1,22	41,26	21,33	60,34
Máximo	1,44	55,51	52,12	67,13
Desvio padrão	0,13	4,49	6,38	5,18
Variância	0,02	20,16	40,70	26,83
CV (%)	11,61	11,62	35,92	9,18

Notas: Foram desconsiderados 4 pontos por erro experimental. CV: coeficiente de variação; D_s : Densidade do Solo; Micro: Microporosidade do Solo; Macro: Macroporosidade do Solo; P_t : Porosidade Total do Solo.

TABELA 3 - Análise exploratória dos atributos físicos do solo em estudo na profundidade 10 - 20 cm

Atributo	<i>Ds</i> (mg m ⁻³)	<i>Micro</i> (dm ³ dm ⁻³)	<i>Macro</i> (dm ³ dm ⁻³)	<i>Pt</i> (dm ³ dm ⁻³)
Nº pontos	112	112	112	112
Média	1,17	36,23	18,48	54,60
Mínimo	0,86	19,50	8,97	39,18
1º Quartil	1,08	34,58	14,68	51,61
Mediana	1,16	36,44	18,42	54,73
3º Quartil	1,24	38,39	21,66	57,74
Máximo	1,56	42,80	36,06	66,35
Desvio padrão	0,12	3,46	4,79	4,49
Variância	0,01	11,97	22,94	20,16
CV (%)	10,26	9,55	25,92	8,22

Notas: Foram desconsiderados 4 pontos por erro experimental. CV: coeficiente de variação; Ds: Densidade do Solo; Micro: Microporosidade do Solo; Macro: Macroporosidade do Solo; Pt: Porosidade Total do Solo.

1.1.1 Densidade do solo (Ds)

Observa-se nas Tabelas 2 e 3 que para o atributo densidade do solo (*Ds*) o coeficiente de variação (CV) é de 11,61% para a profundidade 0 - 10 cm e na profundidade 10 a 20 cm é de 10,26%, ambas consideradas de homogeneidade médias. Segundo GOMES (1987), o coeficiente de variação determina a homogeneidade dos dados em relação à média. Se o coeficiente de variação for inferior a 10% a homogeneidade é considerada alta; média, quando o coeficiente de variação está entre 10 e 20%; baixa homogeneidade quando o coeficiente estiver entre 20% e 30%; acima de 30% é considerada muito baixa homogeneidade.

Pode-se observar também nas Tabelas 2 e 3 que o atributo densidade do solo (*Ds*) na profundidade 0 a 10 cm apresenta valores para a média e a mediana iguais. Os dados têm uma amplitude de 0,60 mg m⁻³. Para a profundidade 10 - 20 cm as estatísticas média e mediana são superiores às encontradas para a profundidade de 0 - 10 cm, com uma amplitude 0,70 mg m⁻³, indicando assim que a densidade é maior em profundidades maiores.

A Figura 7 apresenta os gráficos *boxplot* para esse atributo nas duas profundidades. Observa-se a existência de um ponto discrepante para a profundidade de 10 - 20 cm.

O Teste de Normalidade de Shapiro-Wilks (1965) (Figura 8) revelou que os dados desta variável, nas duas profundidades, possuem distribuição normal de probabilidade. Considerou-se um nível de 5% de significância.

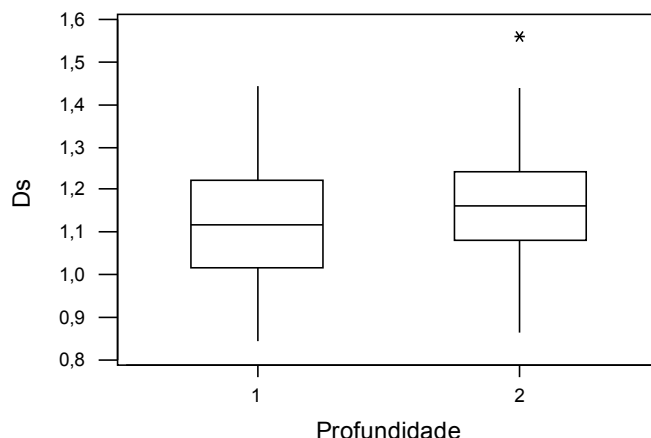


Figura 7 - Boxplot para a densidade do solo nas profundidades 0 -10 cm (1) e 10 - 20 cm (2)

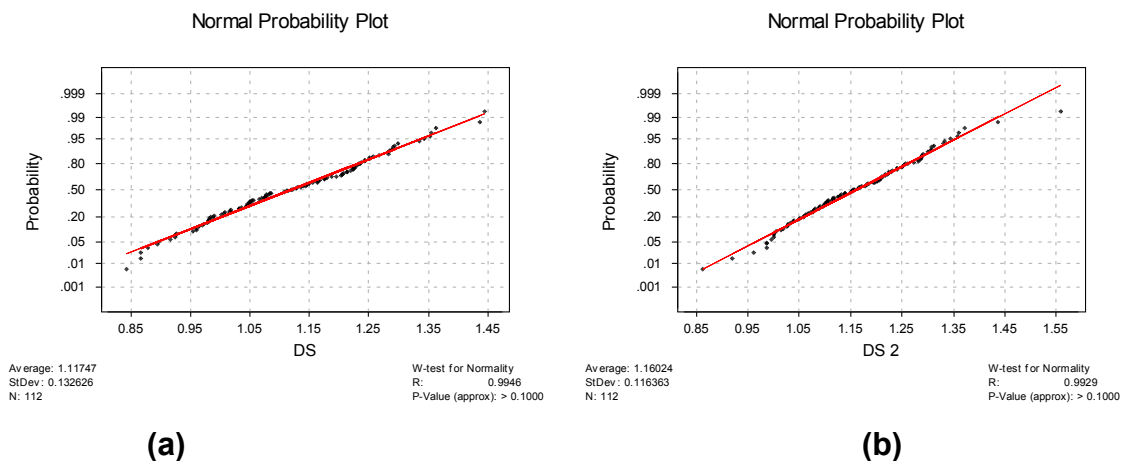
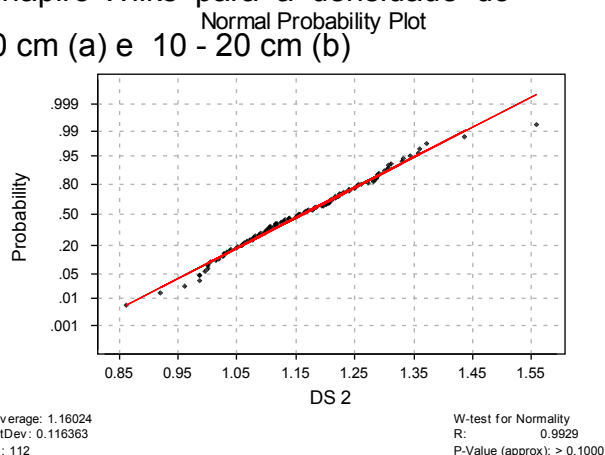


Figura 8 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para a densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)



Conforme TORRES e SARAIVA (1999), cada solo apresenta uma amplitude de densidade com valores máximos e mínimos diferentes, em função de suas características mineralógicas. Em condições de campo, a amplitude de variação da densidade global para solos argilosos, vai desde $1,0 \text{ mg m}^{-3}$, sob condições naturais e ricos em matéria orgânica, a até $1,45 \text{ mg m}^{-3}$, nos solos mal manejados e compactados. Para solos arenosos, a densidade varia, em média, de $1,25 \text{ mg m}^{-3}$ a $1,7 \text{ mg m}^{-3}$. Essas diferenças de densidade e de suas amplitudes entre os solos propiciam que outros parâmetros, obtidos indiretamente a partir da densidade, possam ser utilizados para se tentar quantificar melhor o efeito da compactação sobre a produtividade das culturas.

MUCELIM (2004) encontrou densidade média de $1,25 \text{ mg m}^{-3}$ e coeficiente de variação de 4,60% para uma profundidade de 0 - 20 cm em um plantio de direto para um Latossolo Vermelho Distrófico. Com este CV este atributo foi considerado com alta homogeneidade. A densidade amostral foi de 10 X 10 m em 54 pontos amostrais e o experimento desenvolvido nos meses de dezembro e janeiro de 2002/03.

MILANI (2005) encontrou para uma profundidade de 0 - 10 cm uma densidade média de $1,17 \text{ mg m}^{-3}$ com coeficiente de variação de 5,52% e para uma profundidade de 10 - 20 cm uma densidade média de $1,19 \text{ mg m}^{-3}$ com coeficiente de variação de 4,9%, considerando uma densidade amostral de 7,2 X 7,2 m, em 256 pontos amostrais. A densidade amostral foi de 10 X 10 m em 54 pontos amostrais, a coleta dos dados foi feita nos meses de março e abril de 2004.

1.1.2 Microporosidade do solo

Os valores médios apresentados nas Tabelas 2 e 3 para o atributo microporosidade do solo (*Micro*) foram de 38,64% para a profundidade de 0 - 10 cm, ou seja, a quantidade média de microporos encontrada nas amostras foi de 38,64% para esta profundidade e de 36,23% para a profundidade de 10 - 20 cm. Em geral, a profundidade de 10 - 20 cm apresenta valores para a média, mediana, 1° e 3° quartis, valores máximo e mínimo,

valores inferiores aos encontrados para a profundidade de 0 - 10 cm. A amplitude amostral foi de 42,57% para a profundidade 0 - 10 cm e 47,50% para a profundidade 10 - 20 cm.

A Figura 9 apresenta os gráficos *boxplot* para esse atributo nas duas profundidades, 0 - 10 cm à esquerda e 10 - 20 cm à direita.

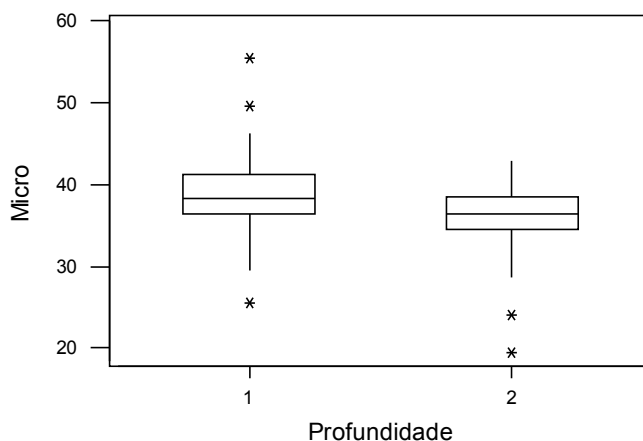


Figura 9 - Boxplot para o atributo microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2)

A Figura 9 mostra a existência de pontos discrepantes nas duas profundidades. Os pontos muito acima da média estão localizados na extremidade superior do mapa, onde houve pouco tráfego de maquinário agrícola e os que tiveram valores muito abaixo da média estão localizados na extremidade inferior, perto da estrada, onde havia maior tráfego e aparentemente uma compactação maior.

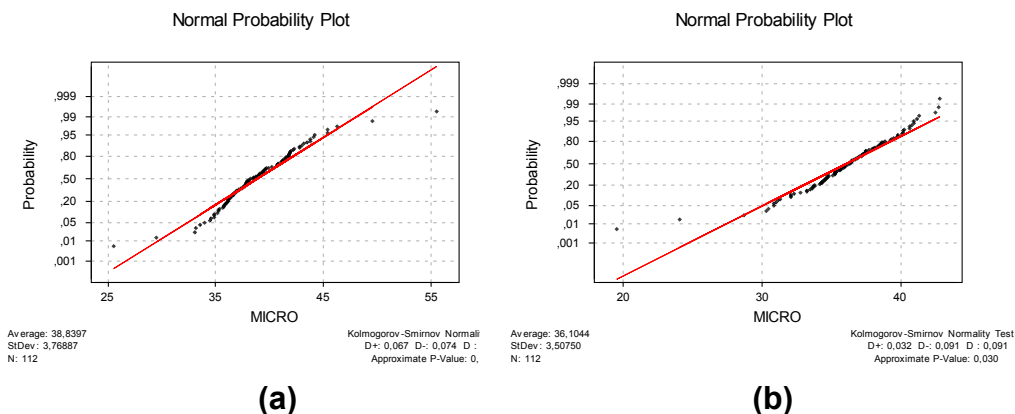


Figura 10 - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

O Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov (Figura 10) revelou que os dados para a microporosidade do solo na profundidade 0 - 10 cm possuem distribuição normal e para a profundidade 10 - 20 cm não possuem distribuição normal de probabilidade. Considerou-se um nível de 5% de significância.

Observa-se nas Tabelas 2 e 3 que para o atributo microporosidade do solo o CV é 11,62%, tendo homogeneidade média, para a profundidade de 0 - 10 cm e alta homogeneidade, 9,55% para a profundidade de 10 - 20 cm.

MUCELIM (2004) encontrou, para esse mesmo tipo de solo, para uma profundidade de 0 - 20 cm, média de 40,0% de microporosidade e um coeficiente de variação 8,18%. A densidade amostral foi de 10 X 10 m em 54 pontos amostrais.

MILANI (2005) encontrou média de 44,59% de microporosidade para uma profundidade de 0 - 10 cm e média de 45,19% para uma profundidade de 10 - 20 cm. Os coeficientes de variação foram respectivamente, 4,46% e 4,15%. Seu experimento foi desenvolvido em um sistema de plantio direto em um solo Latossolo Vermelho Distrófico, considerando uma densidade amostral de 7,2 X 7,2 m, em 256 pontos amostrais.

1.1.3 Macroporosidade do solo

Os valores médios apresentados nas Tabelas 2 e 3 para o atributo macroporosidade do solo (*Macro*) foram de 17,76% para a profundidade de 0 - 10 cm e de 18,48% para a profundidade de 10 - 20 cm. A profundidade de 10 - 20 cm apresenta valores para a média, 1° e 3° quartis, valores máximo e mínimo um pouco superiores aos encontrados na profundidade de 0 - 10 cm.

Observa-se nas Tabelas 2 e 3 que o CV encontrado para a profundidade de 0 - 10 cm foi de 35,92%, valor que é considerado muito alta a heterogeneidade dos dados, segundo GOMES (1987) Para a profundidade de 10 - 20 cm o CV encontrado foi de 25,92% considerado alta heterogeneidade.

MUCELIM (2004) encontrou para esse mesmo tipo de solo, para uma profundidade de 0 - 20 cm, média de 13,0% de macroporosidade e um coeficiente de variação 16,35%, tendo, portanto homogeneidade média. A densidade amostral foi de 10 X 10 m em 54 pontos amostrais.

MILANI (2005) encontrou coeficientes de variação para a macroporosidade de 32,85% e 36,25% para as profundidades de 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, respectivamente. A heterogeneidade para esse atributo foi considerada, portanto, muito alta.

A Figura 11 apresenta os gráficos *boxplot* para essa variável nas duas profundidades, 0 - 10 cm à esquerda e 10 - 20 cm à direita. Observa-se a existência de um ponto discrepante para a profundidade 10 - 20 cm.

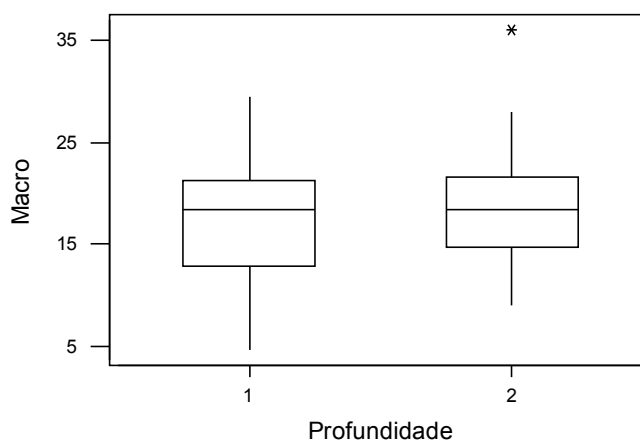
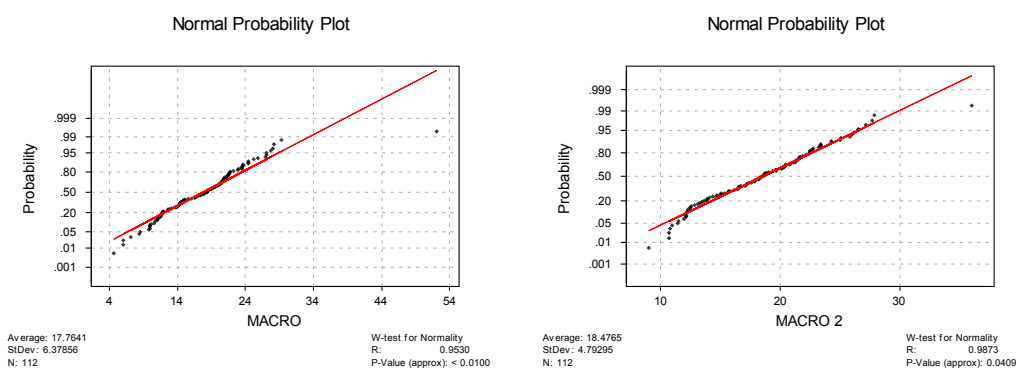


Figura 11 - Boxplot para o atributo macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2)



(a)

(b)

Figura 12 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para a macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

O Teste de Normalidade de Shapiro-Wilks (1965) apresentado na Figura 12 revelou que os dados para a macroporosidade do solo nas duas profundidades possuem distribuição normal de probabilidade.

1.1.4 Porosidade total do solo

Observa-se nas Tabelas 2 e 3 que o atributo porosidade total do solo (Pt) apresenta valores para média, mediana, ponto mínimo, ponto máximo, 1° e 3° quartis próximos, sendo que para a profundidade 10 - 20 cm esses valores são um pouco inferiores aos encontrados para a profundidade de 0 - 10 cm, isso pode ser explicado pelo fato de que a porosidade total (microporosidade + macroporosidade) tende a ser menor quando a profundidade é maior. Segundo AZEVEDO e DALMOLLIN (2004), a porosidade total para Latossolos tem intervalos entre 40 a 60 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$.

As médias para o atributo porosidade total encontrado para a profundidade 0 – 10 cm foram de 56,40% e de 54,60% para a profundidade 10 – 20 cm. O CV nas profundidades 0 - 10 cm e 10 - 20 cm é de 9,18% e 8,22%, respectivamente, portanto mostra alta homogeneidade dos dados, conforme a classificação dada por GOMES (1987).

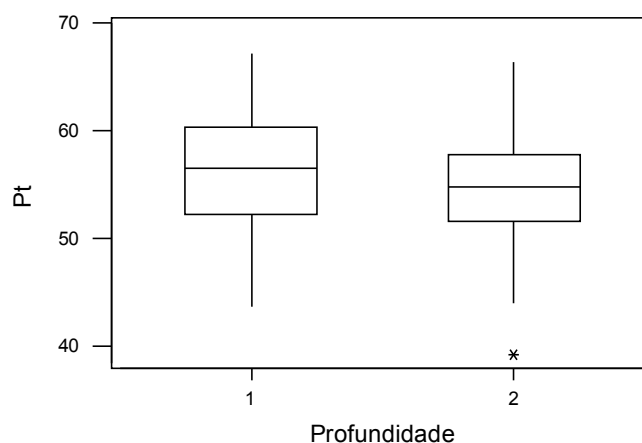


Figura 13 - Boxplot para o atributo porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (1) e 10 - 20 cm (2)

MILANI (2005) encontrou porosidade média de $55,41 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ e $54,87 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ para as profundidades de 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, respectivamente.

Os gráficos *boxplot* para esse atributo nas duas profundidades estão representados na Figura 13. Observa-se a existência de um ponto discrepante para a profundidade de 10 - 20 cm. O Teste de Normalidade de SHAPIRO-WILKS (1965) apresentado na Figura 14 mostrou que os dados desse atributo, nas duas profundidades, possuem distribuição normal de probabilidade.

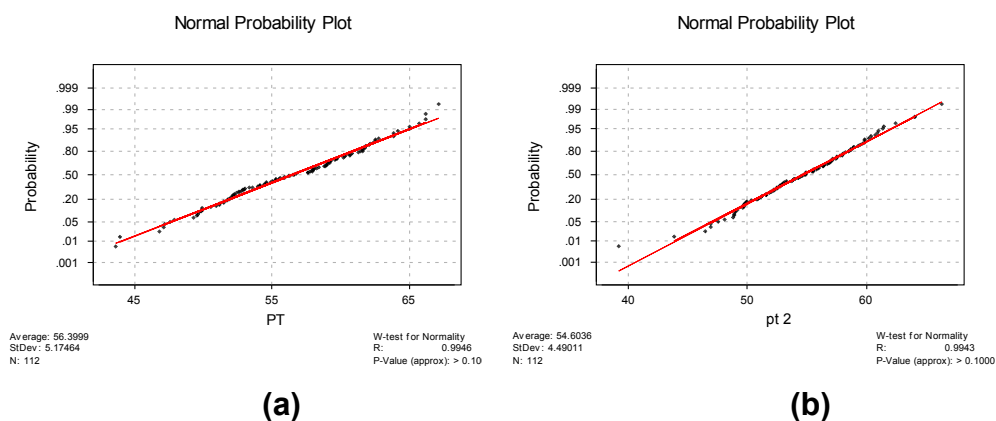


Figura 14 - Teste de normalidade de Shapiro-Wilks para o atributo porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

1.2 Propriedades Hídricas do Solo

1.2.1 Condutividade hidráulica do solo saturado

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da Estatística Descritiva para a variável condutividade hidráulica, infiltração da água no solo e produtividade.

Observa-se que, em média, a condutividade hidráulica (k) obtida foi de $0,00547 \text{ cm s}^{-1}$, com desvio padrão de $0,00603$ e o coeficiente de variação de $110,24\%$. Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica do solo saturado evidenciam a alta variabilidade para a área em estudo. Este CV mostra heterogeneidade muito alta para este atributo.

ABREU (2000) encontrou o valor de $52,8\%$ para o coeficiente de variação da condutividade hidráulica em solo saturado, determinada em campo com a utilização do permeâmetro de Guelph na profundidade de 2 a 12 cm. JURY (1991) indicou que o coeficiente de variação para a condutividade hidráulica em solo saturado pode variar de 48% a 320% . MUCELIM (2004) encontrou $107,71\%$ de coeficiente de variação para a condutividade hidráulica em solo saturado para um Latossolo Vermelho Distrófico para um *grid* com espaçamento médio de 10 m entre amostras. Como a condutividade hidráulica depende do espaço poroso, ele varia bastante de solo para solo e, também, para o mesmo solo com variações estruturais, de compactação, etc.

TABELA 4 - Análise exploratória dos atributos hídricos do solo em estudo

Atributo	$k(\text{cm s}^{-1})$	$I (\text{mm h}^{-1})$
Nº pontos	112	112
Média	0,00547	7,003
Mínimo	0,000	0,773
1º Quartil	0,00156	3,091
Mediana	0,00342	5,151
3º Quartil	0,00685	8,242
Máximo	0,03517	33,483
Desvio padrão	0,00603	6,361
Variância	0,000036	40,462
CV (%)	110,24	90,83

Nota: CV: Coeficiente de Variação; k : Condutividade Hidráulica; I : Infiltração da Água no Solo.

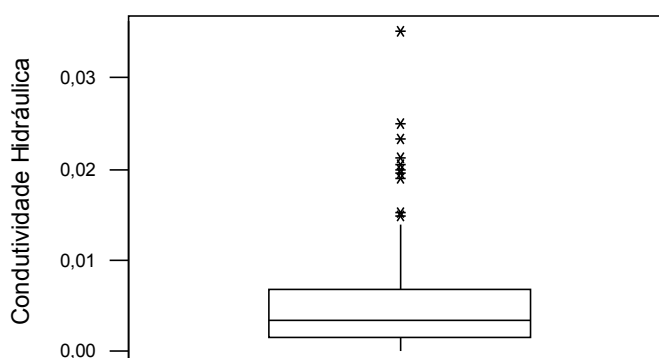


Figura 15 - Gráfico Boxplot para o atributo condutividade hidráulica do solo saturado

Para os dados da condutividade hidráulica (k) do solo saturado foram constatados pontos discrepantes que podem ser observados no gráfico *boxplot* (Figura 15).

O teste de normalidade de Shapiro-Wilks (1965) indicou que os dados não têm distribuição normal de probabilidade (Figura 16), os pontos discrepantes foram considerados neste teste.

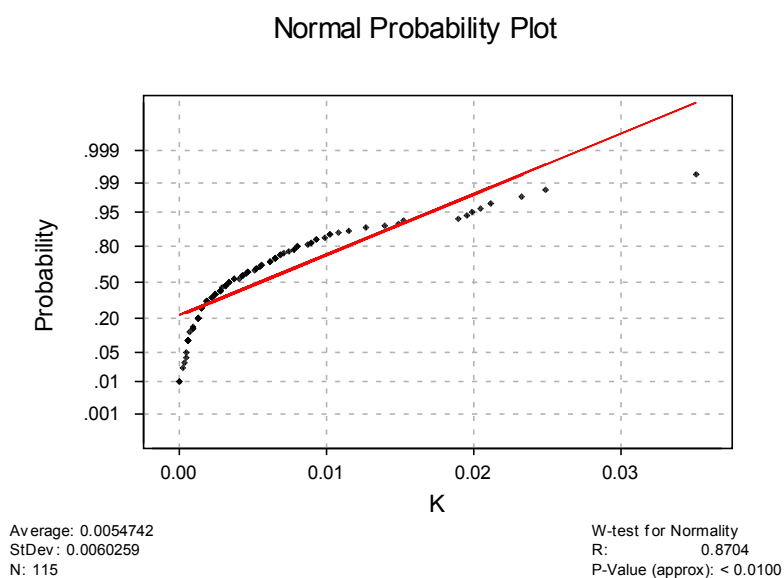


Figura 16 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo condutividade hidráulica do solo saturado.

1.2.2 Infiltração da água no solo

Na Tabela 4 apresentam-se a média encontrada no cálculo da infiltração da água no solo (I), de $7,003 \text{ mm h}^{-1}$ com desvio padrão de $6,361$ e coeficiente de variação de $90,83\%$. Esse atributo também possui alta

variabilidade para a área em estudo. MUCELIM (2004) encontrou média de 13,83 mm h⁻¹ e coeficiente de variação de 69,48% para um espaçamento médio de 10 m entre amostras de um *grid* de 54 pontos amostrais em uma área de 14000 m².

Para os dados da infiltração da água no solo foram constatados pontos discrepantes que podem ser observados no gráfico boxplot da Figura 17.

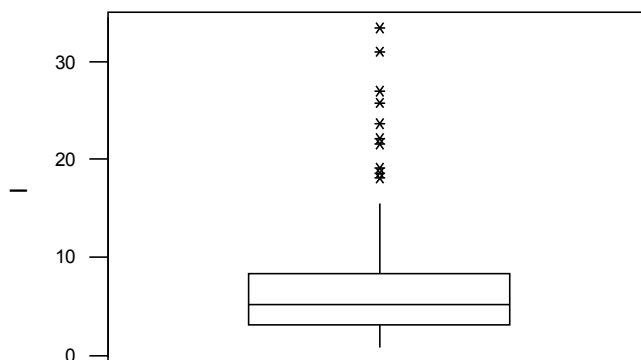


Figura 17 - Gráfico Boxplot para o atributo infiltração da água no solo

O teste de normalidade de Shapiro-Wilks (1965) indicou que esta variável não possui distribuição normal de probabilidade (Figura 18), os pontos discrepantes foram considerados nesta análise.

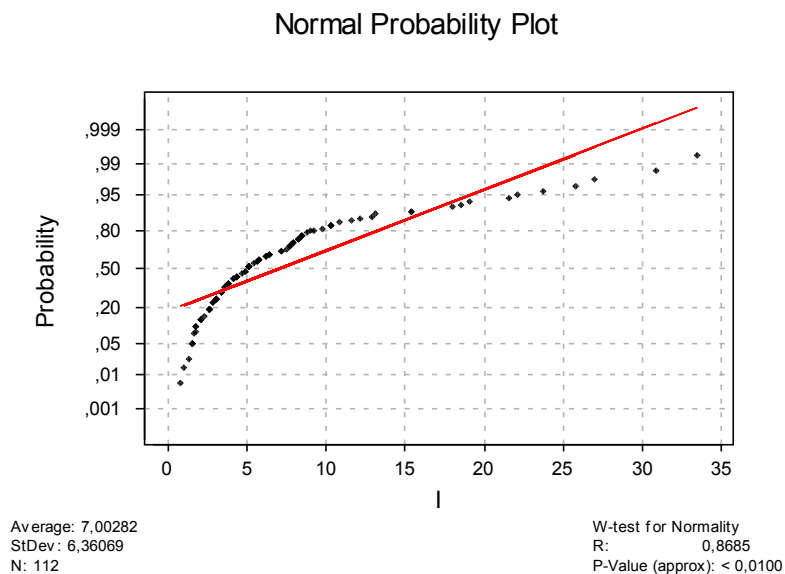


Figura 18 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo infiltração da água no solo

1.2.3 Produtividade da soja

A princípio, a produtividade da soja foi analisada separadamente, segundo seus diferentes cultivares; essa análise é apresentada na Tabela 5. Observa-se que o Cultivar 3 (CD 201) obteve uma média de produtividade menor com $3,569 \text{ t ha}^{-1}$ e o Cultivar 2 (CD 211) obteve uma média de produtividade maior com $3,919 \text{ t ha}^{-1}$. A distribuição para os valores mínimo, máximo, mediana e quartis podem ser observados no gráfico *boxplot* na Figura 19. Como não houve diferença significativa entre estes cultivares, a análise foi refeita considerando a produtividade total entre os três cultivares.

TABELA 5 - Análise exploratória dos três cultivares estudados e da produtividade total

	Cultivar 1 CD 215	Cultivar 2 CD 211	Cultivar 3 CD 201	Prod. Total (t ha^{-1})
N° pontos	33	28	36	97
Média	3,749	3,919	3,569	3,731
Mínimo	2,020	1,760	2,310	1,760
1° Quartil	3,150	3,110	2,983	3,095
Mediana	3,520	3,945	3,460	3,620
3° Quartil	4,165	4,597	4,038	4,225
Máximo	5,870	5,890	5,490	5,890
Desvio padrão	0,857	0,996	0,728	0,859
Variância	0,734	0,992	0,530	0,737
CV (%)	22,86	25,41	20,40	23,01

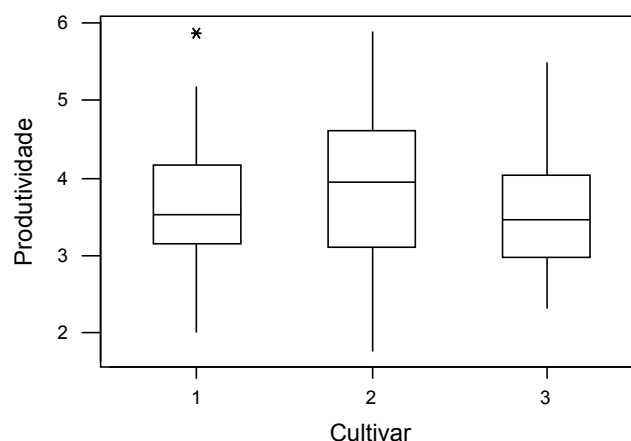


Figura 19 - Gráfico *Boxplot* para os três cultivares para a produtividade da soja

Na Tabela 5 é apresentada a análise exploratória para a produtividade total da soja, a média de produtividade é de 3,73 t ha⁻¹ com desvio padrão de 0,8586. O valor mínimo encontrado foi de 1,76 t ha⁻¹ e máxima de 5,89 t ha⁻¹.

Segundo dados do Departamento de Economia Rural da Secretaria de Agricultura do Paraná a produção média estadual para esta safra foi de 3,36 t ha⁻¹. Observa-se, portanto que em média a produtividade para a área em estudo foi superior à média no Estado do Paraná.

O CV encontrado para a produtividade da soja para esta área foi de 23,01%, existindo alta heterogeneidade da produtividade total da soja. O boxplot para este atributo não revelou a presença de pontos discrepantes (Figura 20).

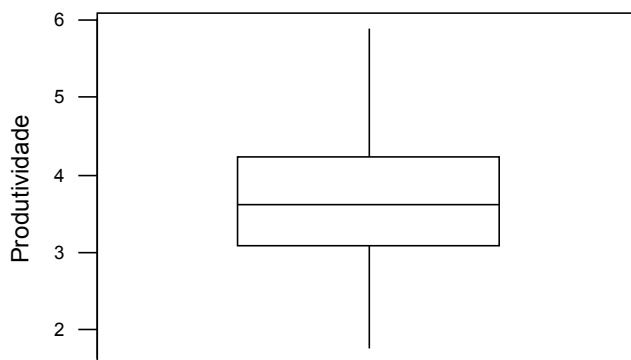


Figura 20 - Gráfico *Boxplot* para o atributo produtividade total da soja

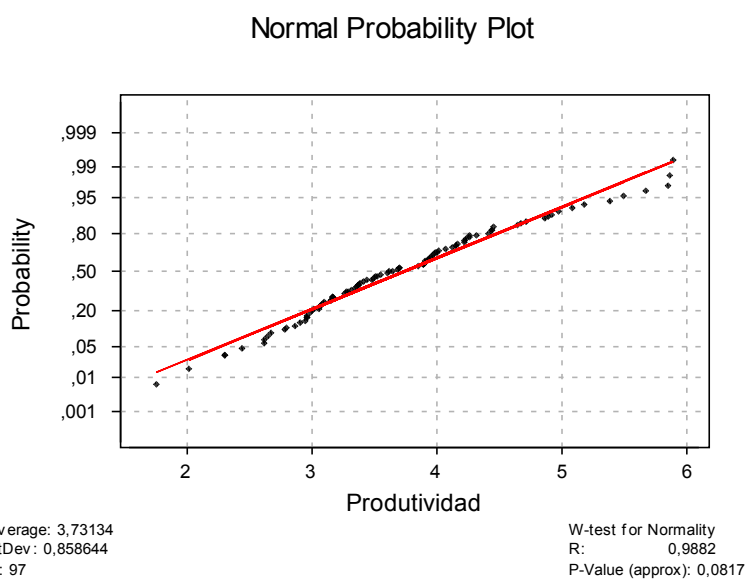


Figura 21 - Teste de normalidade de Shapiro-wilks para o atributo produtividade total da soja

O teste de normalidade de Shapiro-Wilks (1965) revelou que esse atributo possui distribuição normal de probabilidade, ao nível de 5% de significância (Figura 21).

2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Para RIBEIRO JUNIOR, (1995), o gráfico chamado de *post plot* é um método para a avaliação da estacionaridade ou da tendência direcional dos dados. É uma importante ferramenta para esse controle. Neste tipo de gráfico, cada parcela do experimento está classificada segundo os valores correspondentes aos seus quartis (mínimo até 1º quartil; 1º quartil até mediana; mediana até 3º quartil; 3º quartil até valor máximo). Desse modo, os intervalos em que aparecem concentrações de cores iguais, podem indicar a existência de uma sub-região no mapa.

2.1 Atributos Físicos do Solo

As Figuras 22 a 25 mostram os *post plot* para os atributos físicos do solo em estudo nas profundidades 0 - 10 cm e 10 a 20 cm. Observa-se nestes gráficos a inexistência de tendências direcionais, indicando que λ , sendo m um valor constante, indicando que uma das hipóteses necessárias ao uso da Geoestatística está satisfeita. As células em branco indicam as amostras as quais foram desconsideradas por erro na coleta de dados.

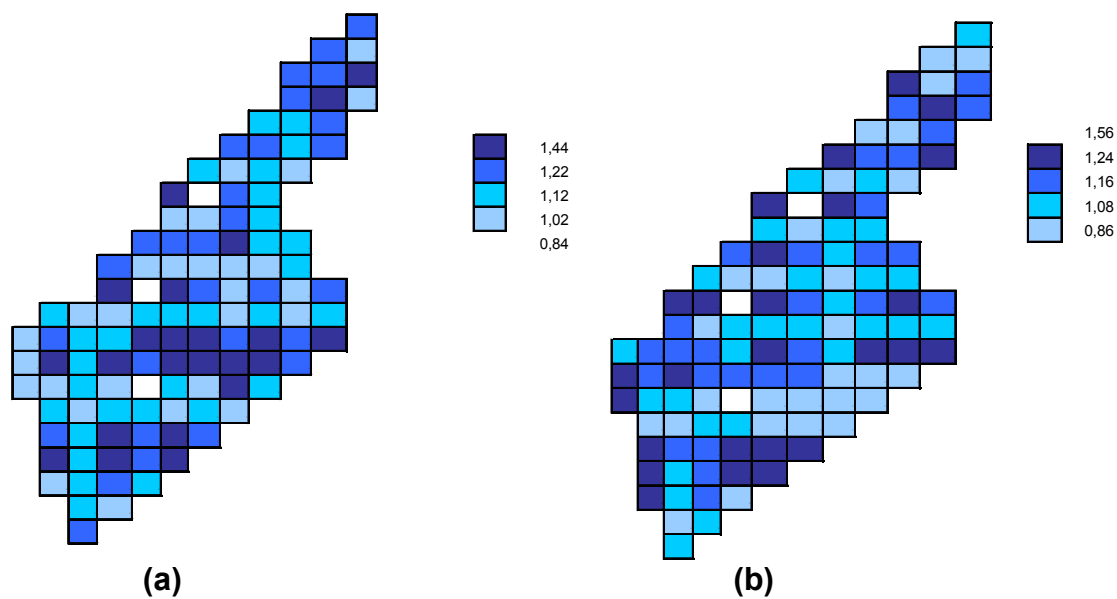


Figura 22 - Gráfico *post plot* para a Densidade do Solo (mg m^{-3}) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

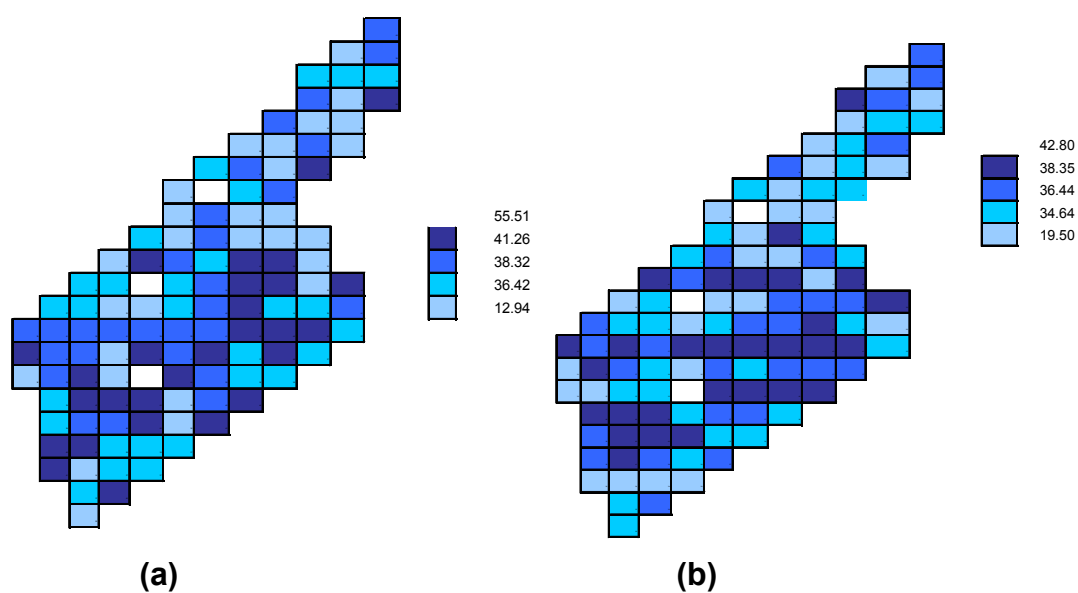


Figura 23 - Gráfico *post plot* para a Microporosidade do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

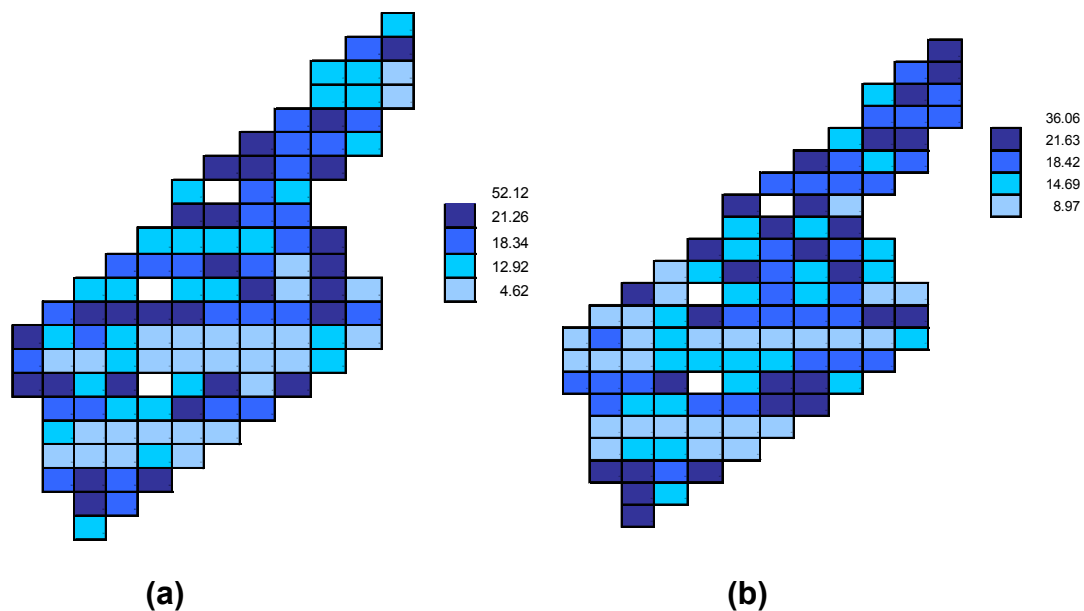


Figura 24 - Gráfico *post plot* para a Macroporosidade do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

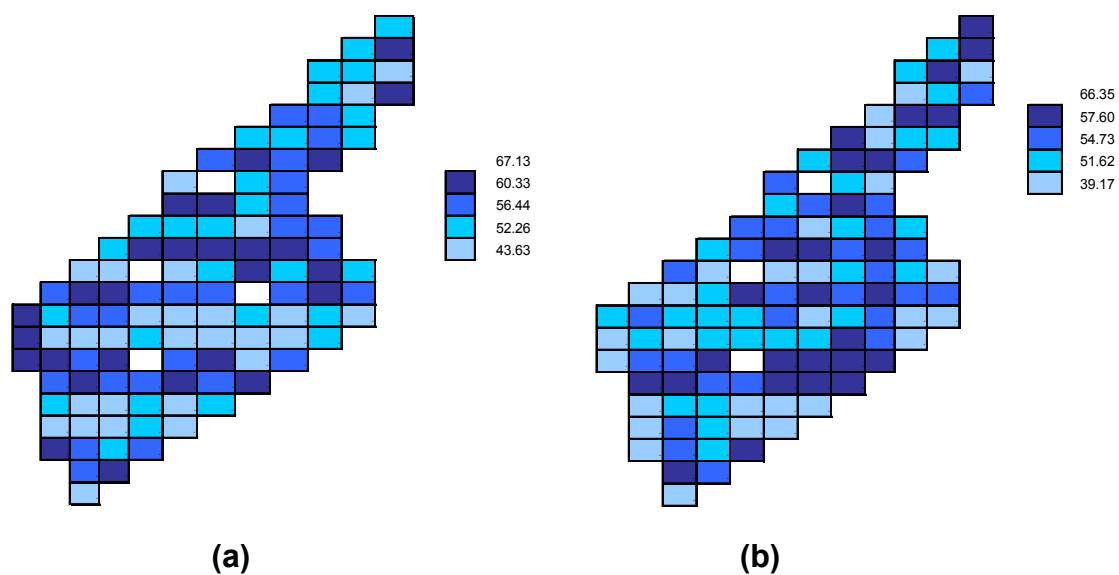


Figura 25 - Gráfico *post plot* para a Porosidade Total do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

Outra forma de identificar a tendência direcional para os atributos em estudo é através dos gráficos da média, mediana e desvio padrão *versus* linha e coluna. Esses gráficos podem ser observados nos Anexos B, C, D, E, F, G, H e I. Apenas os atributos Macroporosidade (Anexo H) e Porosidade Total (Anexo I) nas profundidades 10 - 20 cm apresentam indício da existência de efeito proporcional para o processo em estudo. Para os demais atributos não houve indícios da existência do efeito proporcional. Para eliminar esse efeito proporcional, foi necessário trabalhar com os resíduos ajustando um modelo de regressão polinomial de 2° ordem nas coordenadas X e Y.

Pode-se também identificar a tendência direcional para os atributos em estudo através de gráficos de média móvel *versus* desvio padrão. Para a construção desses gráficos foram utilizadas janelas que se deslocam sobre a área em estudo abrangendo, em cada janela, uma área quadrangular composta de 4 parcelas. Os gráficos são mostrados no Anexo J. Observa-se que o atributo Microporosidade na profundidade 10 a 20 cm parece apresentar algum tipo de tendência direcional. Para as demais variáveis não houve indícios da existência de efeito proporcional ou qualquer relação entre média e desvio padrão. Para a Microporosidade na profundidade 10 a 20 cm foi necessário trabalhar com os resíduos ajustando um modelo de regressão polinomial de 2° ordem nas coordenadas X e Y.

2.2 Atributos Hídricos do Solo

A Figura 26 mostra os gráficos *post plot* para os atributos hídricos do solo. Observa-se nos gráficos a inexistência de tendências direcionais, logo os dados para esses atributos podem ser considerados isotrópicos, indicando que as hipóteses necessárias ao uso da Geoestatística estão satisfeitas. As células em branco indicam as amostras as quais foram desconsideradas por erro na coleta de dados.

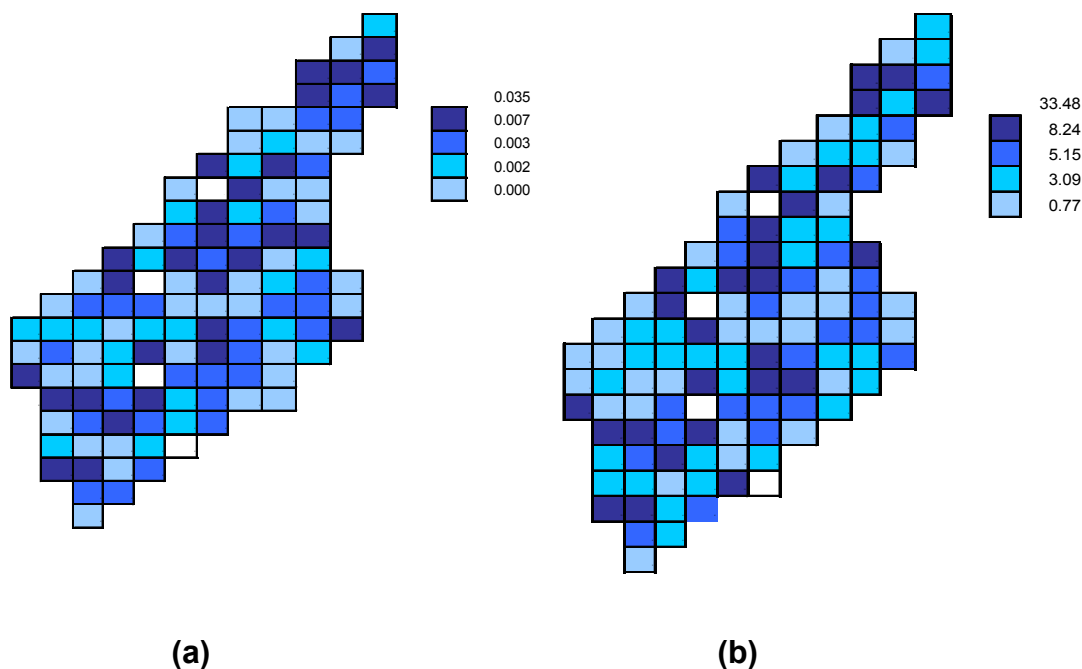


Figura 26 - Gráfico *postplot* para a condutividade hidráulica (cm s^{-1}) (a) e infiltração da água no solo (mm h^{-1}) (b)

Os gráficos da média, mediana e desvio padrão *versus* linha e coluna para os atributos hídricos do solo estão apresentados nos Anexos K e L. Observa-se nos gráficos que não houve indícios da existência do efeito proporcional para esses atributos. Os gráficos da média móvel *versus* desvio padrão estão apresentados no Anexo M. Os gráficos da média móvel *versus* desvio padrão dos atributos infiltração da água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado parecem apresentar algum tipo de tendência direcional. Para eliminar o efeito proporcional foi necessário trabalhar com os resíduos desses atributos, ajustando-se um modelo de regressão polinomial de 2º ordem para as coordenadas X e Y.

2.3 Produtividade da soja

A Figura 27 mostra o *post plot* para a produtividade da soja. Por problemas referentes à coleta de dados, foram perdidas algumas parcelas. Essas parcelas estão representadas com a cor branca. Observa-se no gráfico que a região superior parece apresentar uma produtividade um pouco maior que pode ser explicada pelo fato de que foram utilizados nessa área três cultivares diferentes, com três variedades de soja diferentes e em épocas de plantio também diferentes.

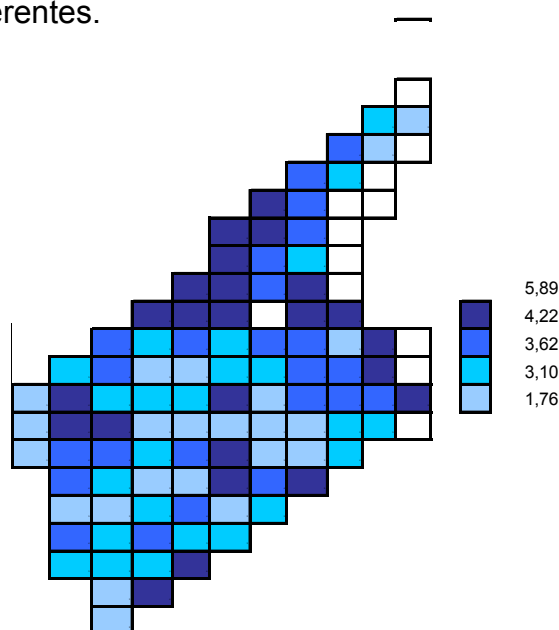


Figura 27 - Gráfico *post plot* para a produtividade da soja ($t\ ha^{-1}$)

O Anexo N apresenta os gráficos da média, mediana e desvio padrão *versus* linha e coluna. Pode-se observar nos gráficos a inexistência de tendência direcional. O gráfico da média móvel *versus* desvio padrão é apresentado no Anexo O. Não houve indícios de tendência direcional.

Para a remoção de tendência dos atributos que apresentaram indício de tendência direcional procurou-se uma equação que melhor se ajustasse aos dados e corrigisse melhor a tendência, diminuindo o coeficiente de correlação entre os pares dos gráficos de dispersão. Foram usados os modelos linear, quadrático e quadrático com interação. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - Modelos utilizados na correção de tendência

Atributo	Modelo ajustado	R ²
<i>Micro</i> (10 – 20 cm)	$-2407284+12,7X+0,239Y-0,000025X^2-0,001Y^2-0,001XY$	7,0
<i>Macro</i> (10 – 20 cm)	$-935599+5,7X+0,052Y-0,00013X^2-0,00001Y^2+0,00001XY$	13,5
<i>Pt</i> (10 – 20 cm)	$-3589785+19,7X+0,322Y-0,000041X^2-0,00001Y^2+0,0001XY$	12,6
<i>I</i>	$-1588901+16,8X-0,131Y-0,000033X^2+0,0001Y^2-0,000XY$	2,0
<i>k</i>	$-8596716+117X-1,57Y-0,000239X^2+0,0001Y^2-0,0001XY$	1,3

Os gráficos *h-scatterplot* foram gerados com o objetivo de verificar a continuidade espacial da função aleatória em estudo. Foram construídos gráficos *h-scatterplots* nas direções x e y . Os gráficos para os atributos em estudo estão apresentados no Anexo O e correspondem a $h = (1,0)$, $h = (2,0)$ e $h = (3,0)$.

Segundo ISAACS e SRIVASTAVA (1989), o *h-scatterplot* é um gráfico no qual, escolhido um vetor h de separação entre os pontos amostrais, valores de $Z(x)$ são associados a valores de $Z(x + h)$. O resultado obtido é uma nuvem de pontos. Mantendo-se fixa a direção de h e construindo-se o gráfico *h-scatterplot* para diversos valores de h , pode-se fazer uma análise preliminar da continuidade espacial da variável em estudo, na direção considerada. Se a continuidade espacial é grande, espera-se que, para pequenos valores de h , haja uma grande concentração de pontos próximos à reta $Z(x + h) = Z(x)$, pois a diferença entre $Z(x)$ e $Z(x + h)$ deve ser pequena. À medida que h aumenta, diminui a similaridade entre os seus valores, acarretando dispersão nos pontos que constituem a nuvem. Portanto, construindo o *h-scatterplot* para várias direções de h , pode-se investigar se há ou não direções de maior continuidade espacial.

Para as variáveis em estudo, os gráficos *h-scatterplots* (Anexo P) apresentaram dependência entre os dados amostrais, ou seja, observa-se que

os pontos correspondentes a $h = (1, 0)$ são ligeiramente mais concentrados ao redor da reta $Z(x + h) = Z(x)$ do que os pontos $h = (2, 0)$ e $h = (3, 0)$. Esse fato sugere que existe algum grau de continuidade dos dados na direção estudada.

3 ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL ATRAVÉS DOS SEMIVARIOGRAMAS

A isotropia foi estudada através da construção de semivariogramas direcionais nas direções 0° , 45° , 90° e 135° . Verificou-se que o seu comportamento é similar. Os semivariogramas para os processos foram construídos com o objetivo de determinar as estruturas de dependência espacial. Para os atributos que tiveram distribuição normal de probabilidade que são: densidade do solo 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, microporosidade 0 - 10 cm, macroporosidade 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, porosidade total 0 - 10 cm e 10 - 20 cm e produtividade da soja, foi utilizado o estimador clássico de MATHERON (1964) para a função semivariância experimental. Para os atributos que não tiveram distribuição normal de probabilidade foi utilizado o estimador de CRESSIE e HAWKINS (1980) definido na Equação 17, estes atributos são: microporosidade 10 - 20 cm, condutividade hidráulica e infiltração da água no solo. Foi utilizado o método de ajuste dos mínimos quadrados ponderados pelo número de pares (WLS1). O *cutoff* utilizado foi de 50%, sendo este valor de aproximadamente 575,86 m, pois a distância máxima considerada foi de 1151,72 m. Os atributos que tiveram indício de tendência direcional (microporosidade 10 - 20 cm, macroporosidade 10 - 20 cm, porosidade total 10 - 20 cm, condutividade hidráulica, infiltração da água no solo) foram trabalhados através de seus resíduos, ajustando-se um modelo de regressão polinomial de 2° ordem nas coordenadas x , y , apresentado na Tabela 7.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros e modelos ajustados ao semivariograma de cada atributo em estudo.

Para a avaliação quantitativa da variabilidade espacial foi considerado o coeficiente do efeito pepita relativo, $C_0 \neq 0$.

O grau de dependência espacial é analisado, segundo o coeficiente de efeito pepita relativo. Para SOUZA et al. (1999), esse coeficiente é classificado da seguinte forma: para valores menores que 25% a dependência espacial é classificada como forte; para valores entre 25 e 75% a dependência espacial é considerada moderada e para valores superiores a 75% é classificada como fraca dependência espacial.

Observa-se na Tabela 7 que o atributo densidade na profundidade 0 - 10 cm possui efeito pepita puro, todos os demais atributos estudados possuem moderada dependência espacial. Os semivariogramas experimentais estão apresentados nas Figuras 28 a 33.

TABELA 7 - Resultados da análise geoestatística para os atributos em estudo

Atributos	Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Patamar ($C_0 + C_1$)	Alcance a	
<i>Ds</i> (0-10cm)	*	---	---	---	---
<i>Ds</i> (10-20cm)	*	0,007	0,0130	377,725	53,8
<i>Micro</i> (0-10cm)	*	7,420	14,697	257,540	50,5
<i>reMicro</i> (10-20cm)	**	5,613	9,950	335,117	56,4
<i>Macro</i> (0-10cm)	*	18,437	31,870	118,863	57,9
<i>reMacro</i> (10-20cm)	*	14,719	24,532	179,115	60,0
<i>Pt</i> (0-10cm)	*	17,277	28,574	369,140	60,5
<i>rePt</i> (10-20cm)	*	11,708	18,940	184,892	61,8
<i>re</i> k_{fs}	**	1482,5	2264,00	96,219	65,0
<i>re I</i>	**	13,777	25,401	206,032	54,2
Prod.	*	0,446	0,8170	345,062	54,6

Nota: (*): Estimador de Matheron; (**): Estimador de Cressie e Hawkins; *reMicro*: resíduo da microporosidade; *reMacro*: resíduo da macroporosidade; *rePt*: resíduo da porosidade total; *re* k_{fs} : resíduos da condutividade hidráulica; *re I*: resíduo da infiltração da água no solo.

A Figura 28 apresenta o ajuste teórico do semivariograma para o atributo densidade do solo nas duas profundidades estudadas. Para o ajuste da densidade na profundidade 10 – 20 cm foi utilizado o modelo exponencial e o

estimador de Matheron. O alcance encontrado foi de 452,451 m, indicando os raios de dependência espacial entre amostra.

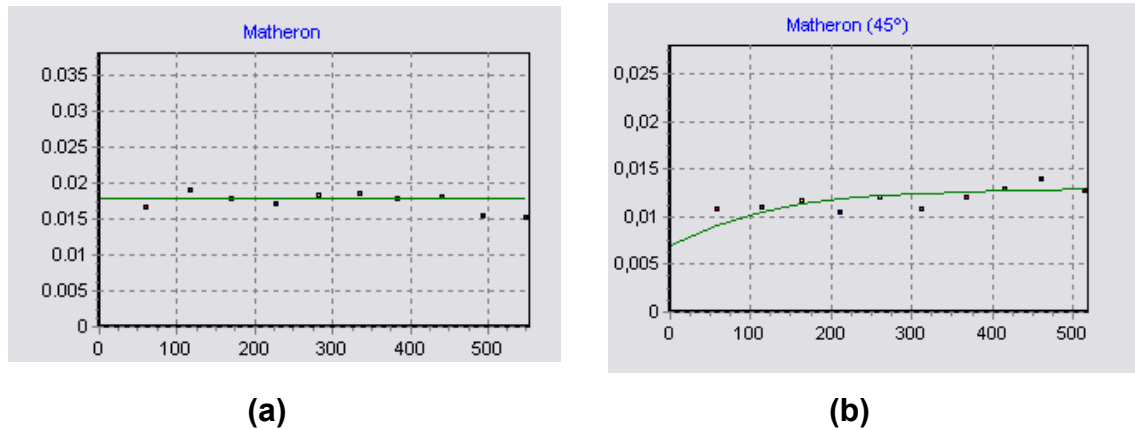


Figura 28 - Semivariograma da densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

A Figura 29 mostra os semivariogramas para a microporosidade do solo nas duas profundidades em estudo. Foram utilizados modelos exponenciais em ambas as profundidades e os alcances encontrados foram de 257,54 m para a profundidade 0 - 10 cm e 335,12 m para a profundidade 10 - 20 cm que são os raios de dependência espacial respectivamente. Como para a profundidade 10 - 20 cm houve indício de efeito proporcional, o semivariograma foi ajustado para os resíduos segundo o estimador de CRESSIE e HAWKINS (1980), pois não houve distribuição normal de probabilidade para os resíduos em estudo.

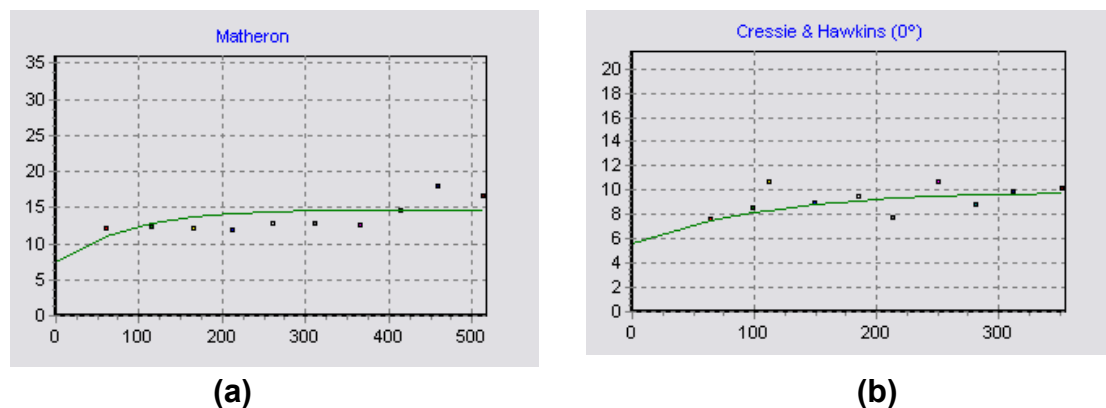


Figura 29 - Semivariograma da microporosidade do solo na profundidade 0 - 10 cm (a) e dos resíduos da microporosidade do solo na profundidade 10 - 20 cm (b)

Na Figura 30 podem ser observados os semivariogramas para a macroporosidade do solo nas duas profundidades em estudo. Para a profundidade 0 - 10 cm foi usado o modelo exponencial e o alcance encontrado foi de 188,86. A macroporosidade na profundidade 10 - 20 cm apresentou indício de efeito proporcional e, portanto, o semivariograma teórico foi ajustado para os resíduos segundo o estimador de Matheron com modelo Gaussiano, o alcance encontrado foi de 179,12 m.

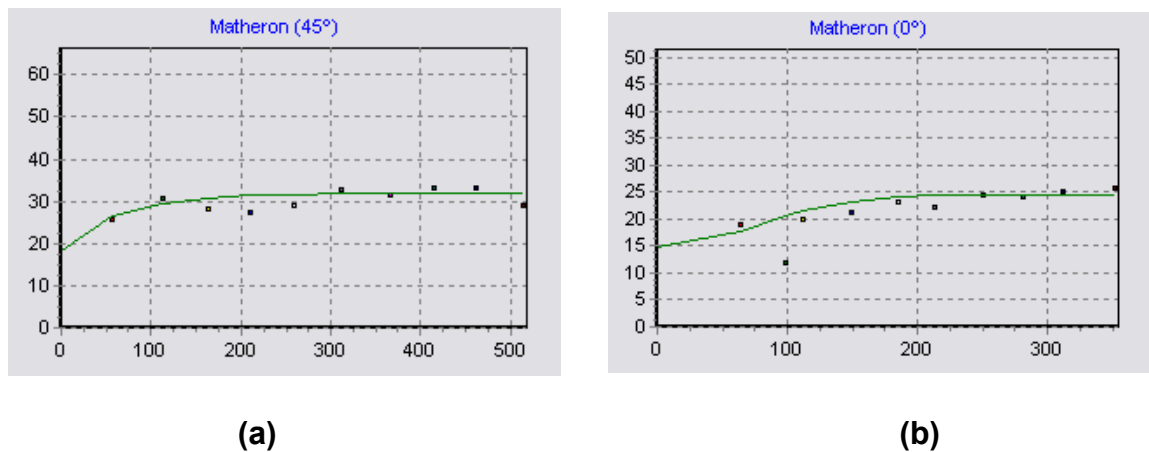


Figura 30 - Semivariograma da macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

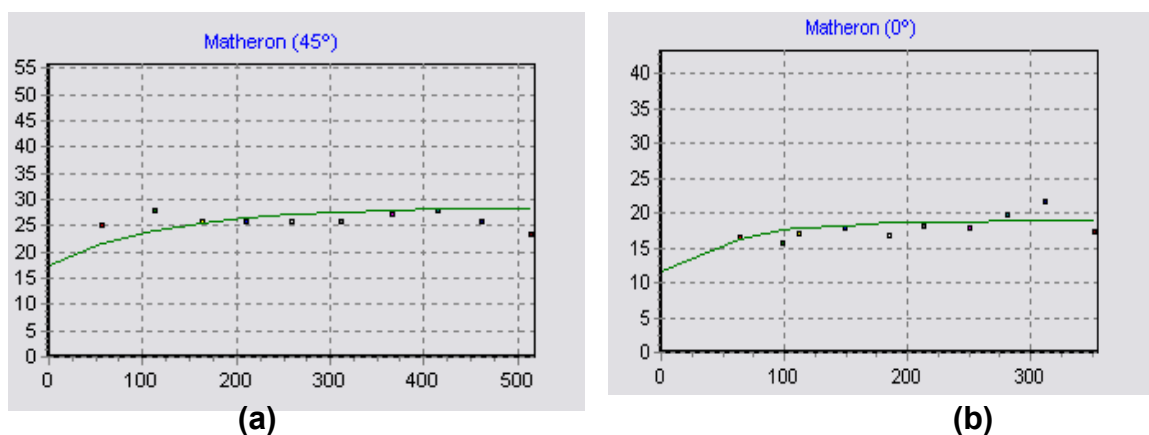


Figura 31 - Semivariograma da porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

Na Figura 31 são apresentados os semivariogramas para o atributo porosidade total do solo nas duas profundidades em estudo. O alcance encontrado foi de 369,14 m para a profundidade 0 – 10 cm. O modelo ajustado foi o exponencial com estimador de Matheron. Para a profundidade 10 - 20 cm o semivariograma foi ajustado através de seus resíduos um modelo Gaussiano com alcance de 184,89 m, pois havia indício da existência de efeito proporcional.

A Figura 32 apresenta os semivariogramas para a condutividade hidráulica e infiltração da água no solo. Esses dois atributos mostraram indícios da existência de efeito proporcional e, portanto, foram ajustados modelos de semivariogramas para os resíduos em estudo. Os alcances encontrados foram de 96,22 m para o resíduo condutividade hidráulica e de 206,03 m para o resíduo Infiltração da água no solo. Foram utilizados os ajustes dos modelos exponenciais aos valores utilizando o estimador de CRESSIE e HAWKINS (1983), pois estes atributos não possuem distribuição normal de probabilidade.

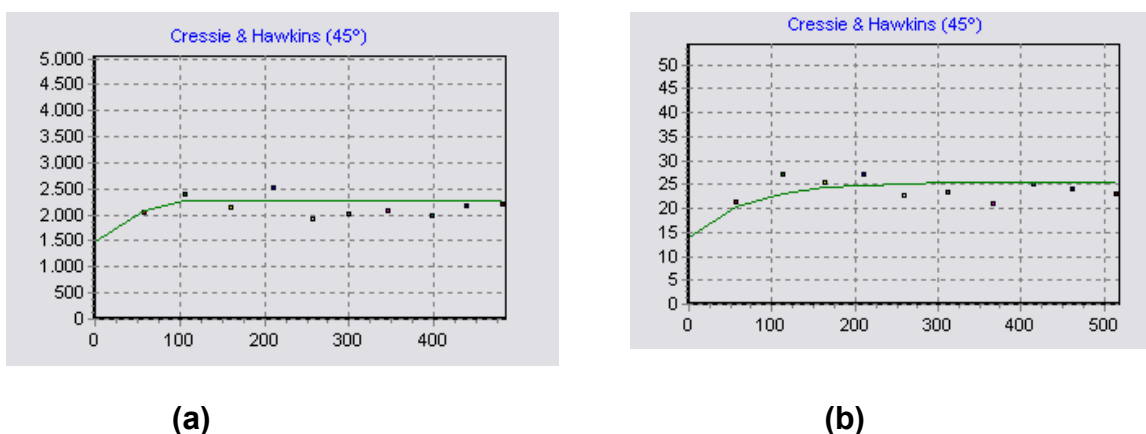


Figura 32 - Semivariograma da condutividade hidráulica do solo saturado ($\text{cm s}^{-1} \cdot 10^4$) (a) e da infiltração da água no solo (b)

A Figura 33 apresenta o semivariograma para a Produtividade da Soja (t ha^{-1}). O alcance encontrado foi de 345,06 m e o modelo ajustado foi o exponencial, segundo estimador clássico de Matheron.

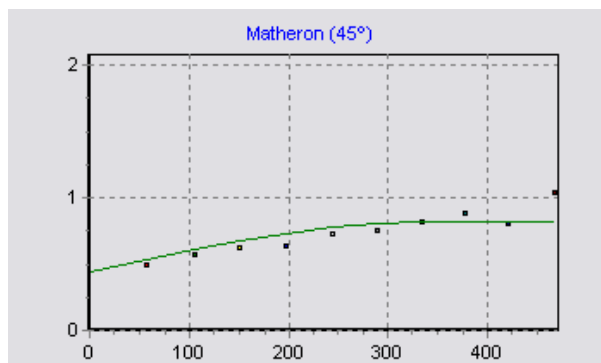


Figura 33 - Semivariograma da produtividade da soja ($t\ ha^{-1}$)

Outra forma de constatar a existência de dependência espacial entre os dados em estudo é através da construção de envelopes para os semivariogramas experimentais. Foi usado o software GeoR 3.10 (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2003). Nessa análise, os dados são considerados dependentes espacialmente quando existir pelo menos um ponto não pertencente aos envelopes e com fraca dependência espacial quando os pontos encontram-se dentro do envelope.

Os envelopes de semivariogramas para os atributos em estudo estão apresentados nas Figuras 34 a 39.

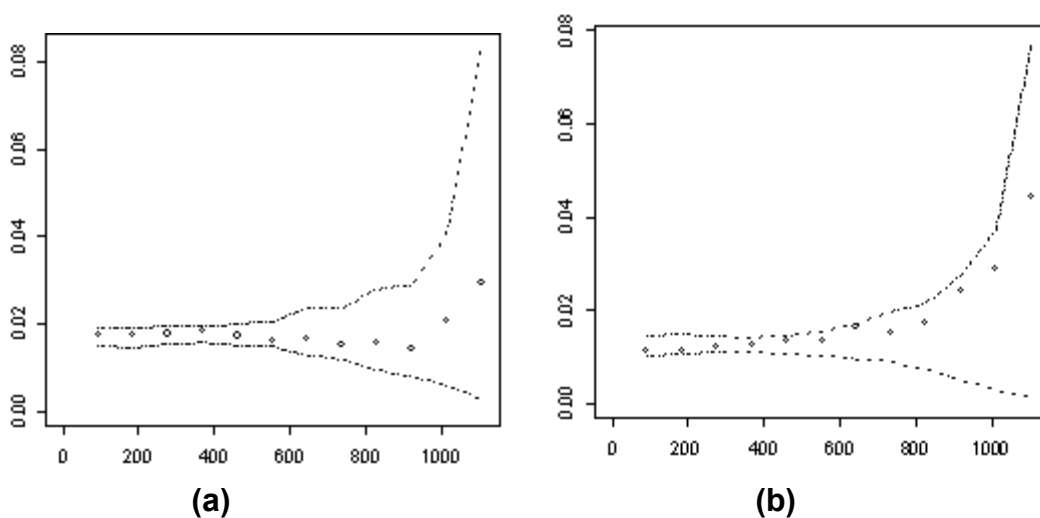


Figura 34 - Envelopes de semivariograma para a densidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

Observa-se que os atributos densidade do solo 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, microporosidade 0 - 10 cm, macroporosidade 0 - 10 cm e 10 - 20 cm, porosidade total 0 - 10 cm e 10 - 20 cm) e condutividade hidráulica do solo apresentaram fraca dependência espacial, segundo essa análise. Já os atributos microporosidade do solo (10 - 20 cm), infiltração da água no solo e produtividade da soja apresentaram dependência espacial.

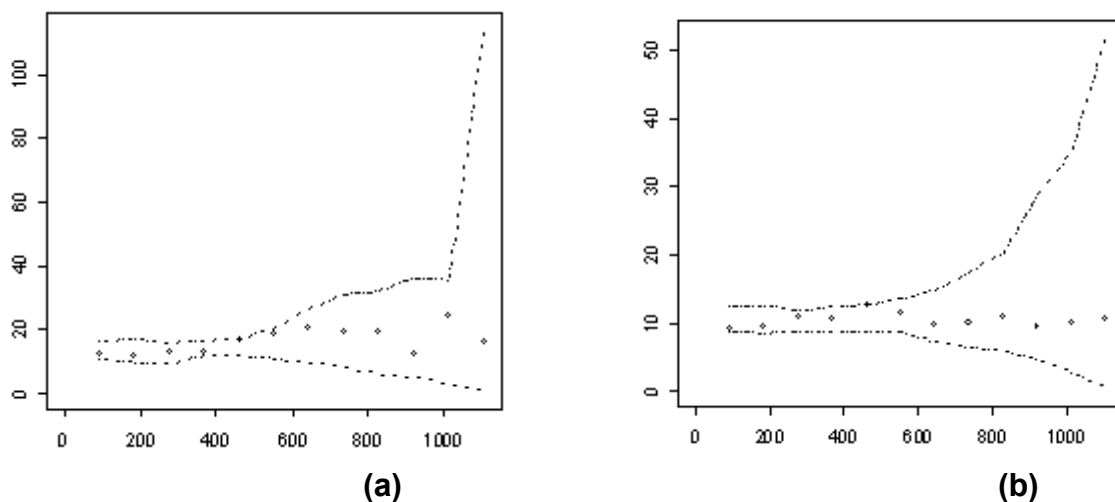


Figura 35 - Envelopes de semivariograma para a microporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

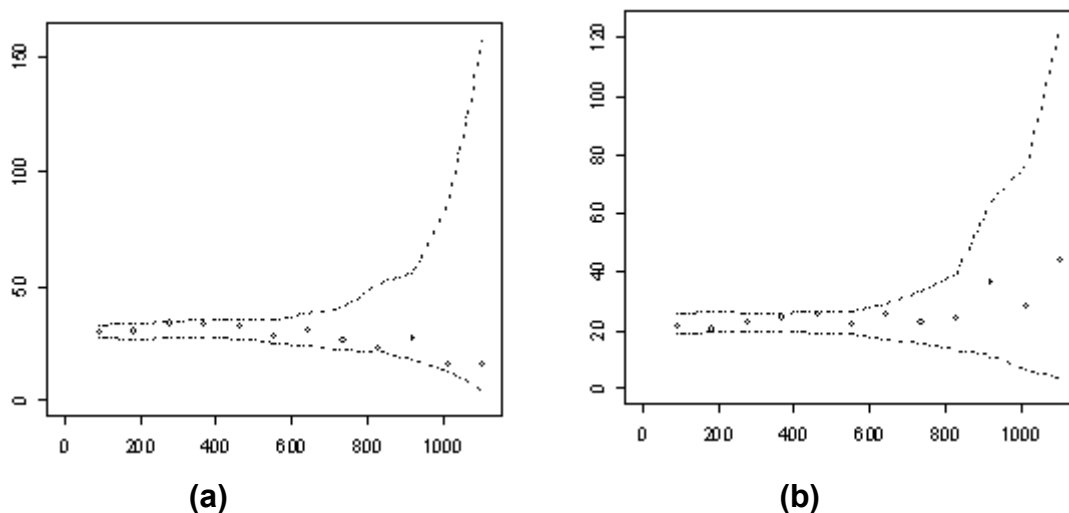


Figura 36 - Envelopes de semivariograma para a macroporosidade do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

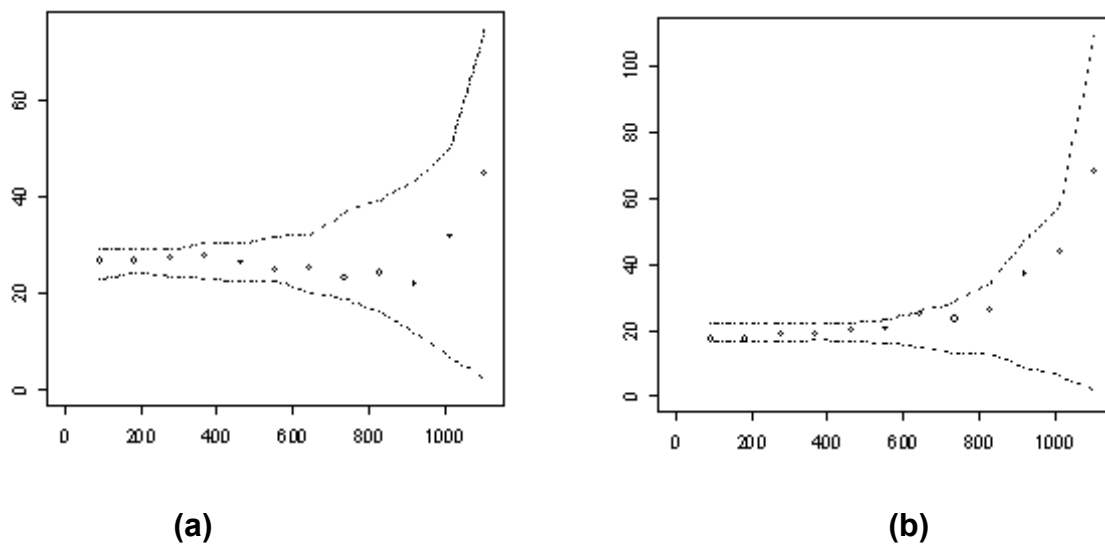


Figura 37 Envelopes de semivariograma para a porosidade total do solo nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 10 - 20 cm (b)

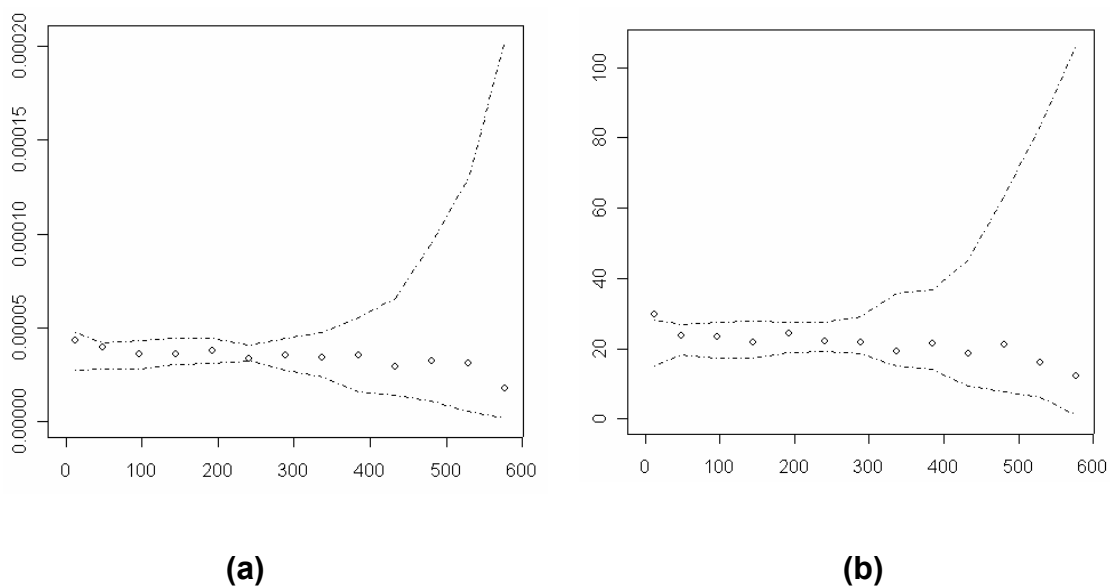


Figura 38 - Envelopes de semivariograma para a condutividade hidráulica do solo saturado (a) e da infiltração da água no solo (b)

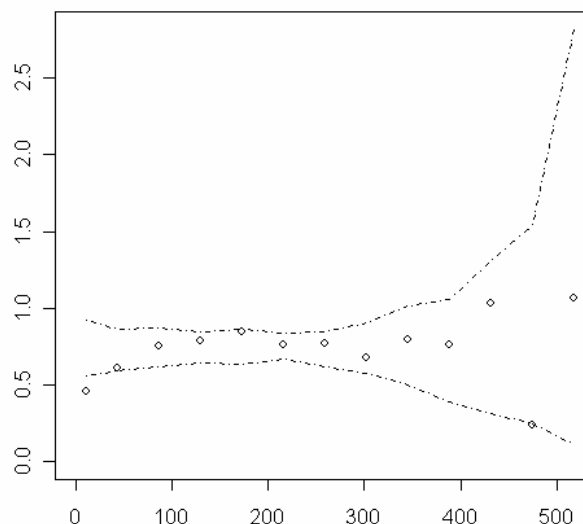


Figura 39 - Envelope de semivariograma para a produtividade da soja

4 MAPAS TEMÁTICOS PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO E PARA A PRODUTIVIDADE DA SOJA

As Figuras 40 a 45 apresentam os mapas temáticos para os atributos em estudo.

A Figura 40 apresenta os mapas temáticos pela técnica da krigagem ordinária para o atributo densidade do solo nas profundidades 0 – 10 cm e 10 - 20 cm. Observa-se que esses mapas diferem um pouco quanto à forma. Percebe-se que para a profundidade 0 – 10 cm a densidade está entre 1,14 e 1,29 mg m^{-3} na região inferior direita e para a profundidade 10 – 20 cm a densidade para este intervalo está distribuída sobre toda a área em estudo com exceção da região do meio e superior do mapa temático. Os valores entre 1,04 e 1,14 mg m^{-3} estão bem distribuídos ao longo do mapa na região do meio e superior para a profundidade 0 – 10 cm e para a profundidade 10 – 20 cm os valores estão concentrados na região do meio e superior. Os valores mais altos (entre 1,23 e 1,50 mg m^{-3}) foram observados somente na profundidade de 10 - 20 cm na região esquerda próximos a uma estrada existente neste local.

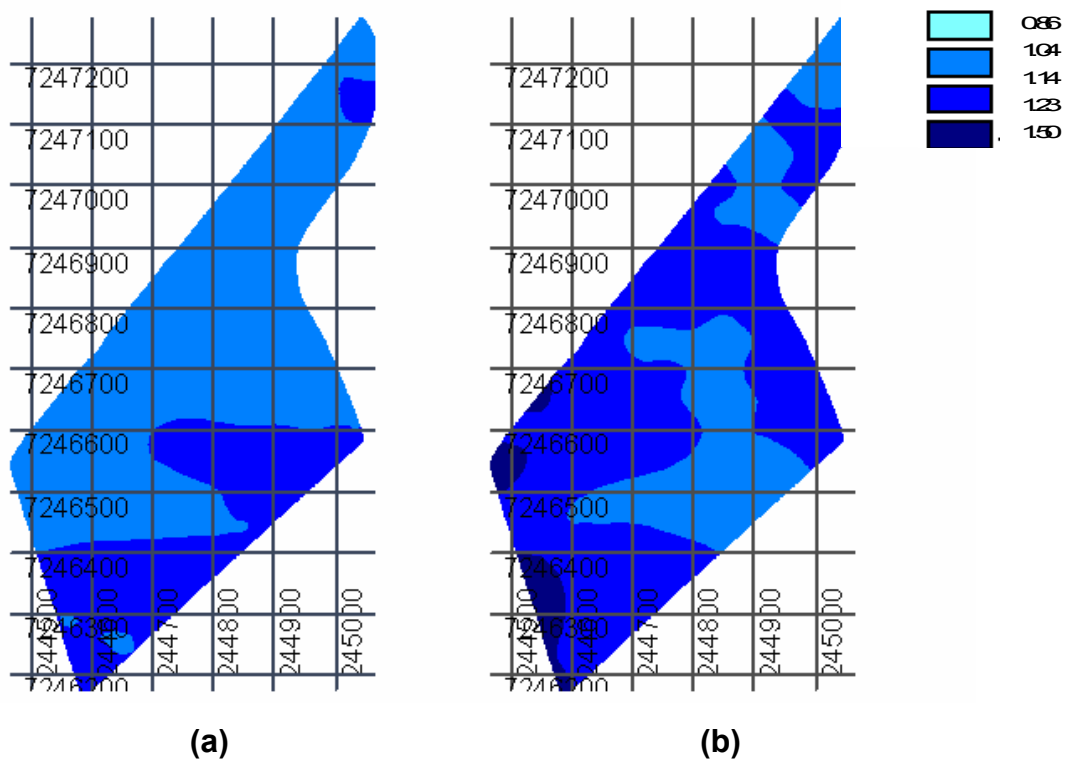


Figura 40 - Mapas do atributo Densidade do Solo (mg m^3) nas profundidades 0 – 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b)

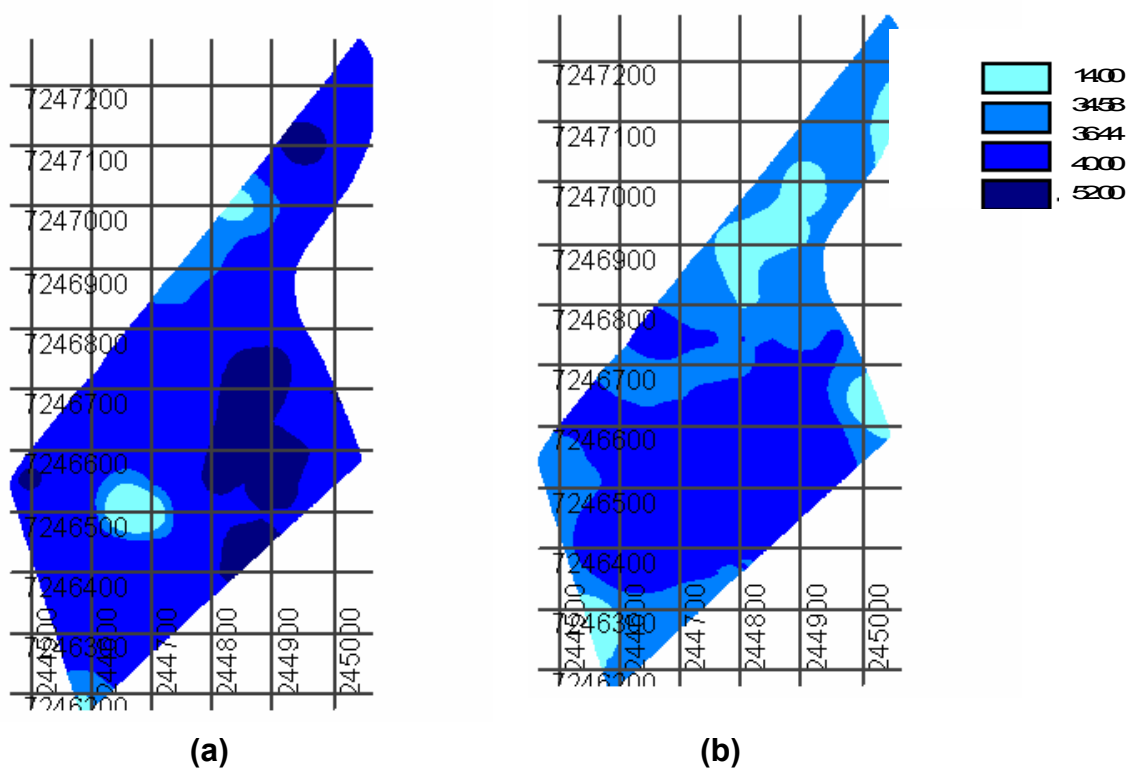


Figura 41 - Mapas da Microporosidade do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 – 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b)

A Figura 41 apresenta o comportamento do atributo Microporosidade do solo nas profundidades 0 – 10 cm e 10 – 20 cm. Os baixos valores (entre 14,00 e 34,58 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) encontram-se em sub-regiões com localizações parecidas para as duas profundidades estudadas. Os valores entre 36,44 e 40,00 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ e entre 40,00 e 52,00 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ são observados apenas para a profundidade 0 – 10 cm, portanto, nota-se que na parte mais superficial do solo a quantidade de microporos é maior o que se deve ao fato do teor de matéria orgânica ser maior neste local.

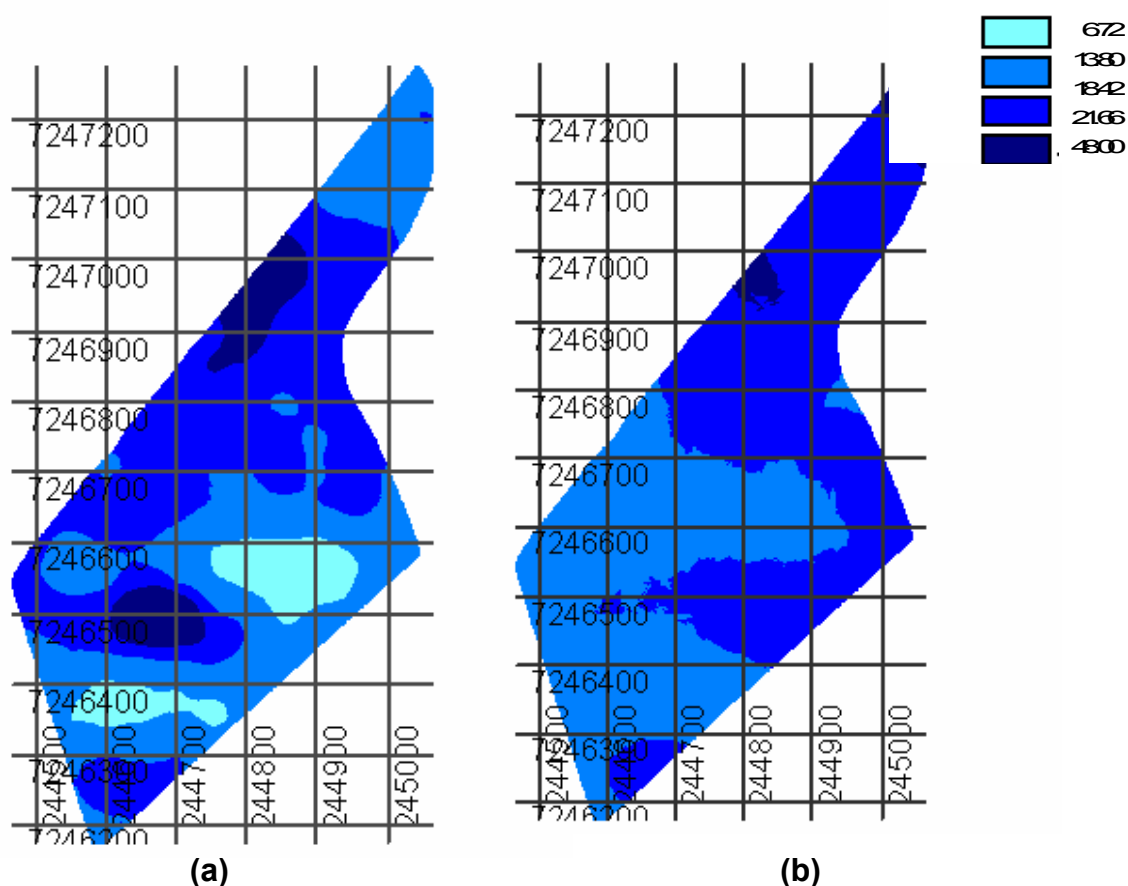


Figura 42 - Mapas do atributo Macroporosidade do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 – 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b)

A Figura 42 apresenta os mapas temáticos para o atributo macroporosidade do solo nas profundidades 0 – 10 cm e 10 – 20 cm. Observa-se na profundidade 0 – 10 cm, duas sub-regiões com baixos valores

para a macroporosidade (entre 6,72 e 13,80 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$). Os altos valores (entre 21,66 e 48,00 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) são observados nas duas profundidades, mas em regiões pequenas no mapa. Para os valores intermediários existe um padrão semelhante nas duas profundidades estudadas.

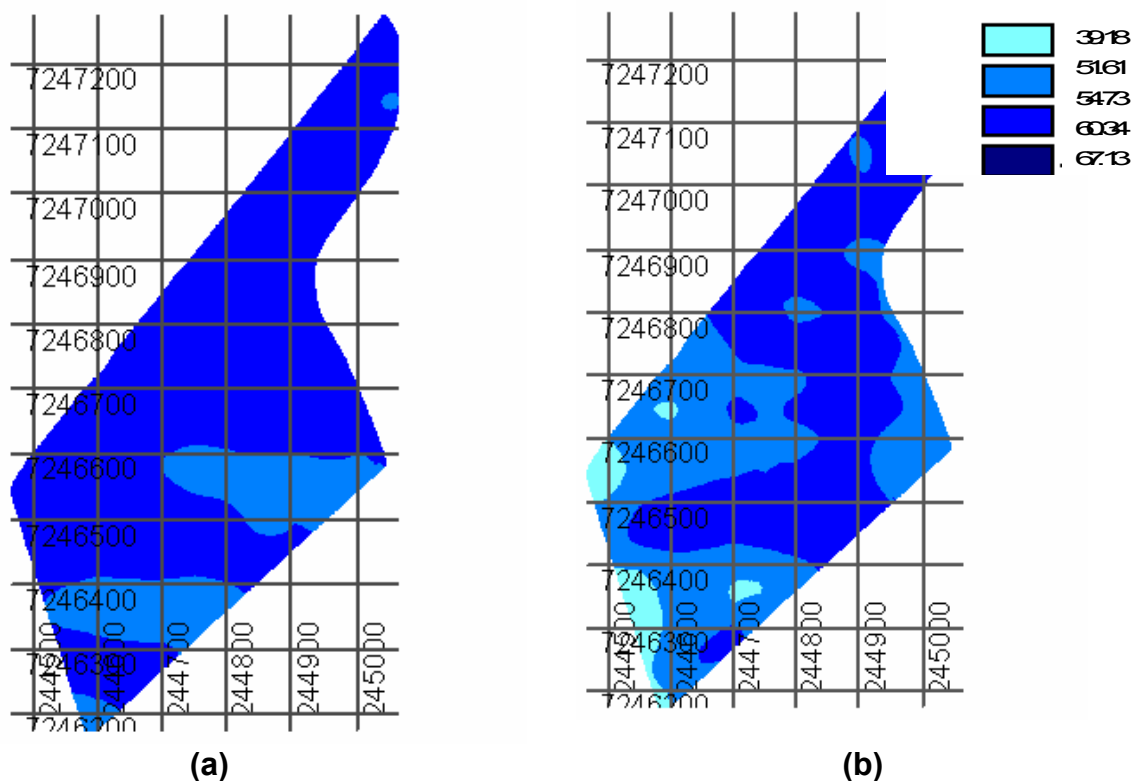


Figura 43 - Mapas do atributo Porosidade Total do Solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) nas profundidades 0 – 10 cm (a) e 10 – 20 cm (b)

A Figura 43 apresenta os mapas temáticos para o atributo porosidade total do solo nas profundidades 0 – 10 cm e 10 – 20 cm. Para a profundidade 10 – 20 cm observa-se algumas sub-regiões com porosidade total mais baixa (entre 39,18 e 51,61 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) na região inferior esquerda. Nesse local existe uma estrada e existe um indício de compactação maior. Na comparação dos mapas, nas duas profundidades estudadas, observa-se que a porosidade total é maior na parte mais superficial do solo, na profundidade 0 – 10 cm.

A Figura 44 apresenta os mapas temáticos para os atributos hídricos do solo. Pode-se observar um padrão de variabilidade espacial muito semelhante para os dois atributos. Em regiões onde a condutividade hidráulica

é maior a infiltração da água no solo também é maior. Este mesmo padrão ocorre para valores menores da condutividade hidráulica e da infiltração. Observa-se que a condutividade hidráulica e a infiltração da água no solo são menores nas extremidades da área em estudo, pois são os locais em que há maior tráfego de maquinário agrícola, evidenciando assim uma maior compactação do solo nestes pontos.

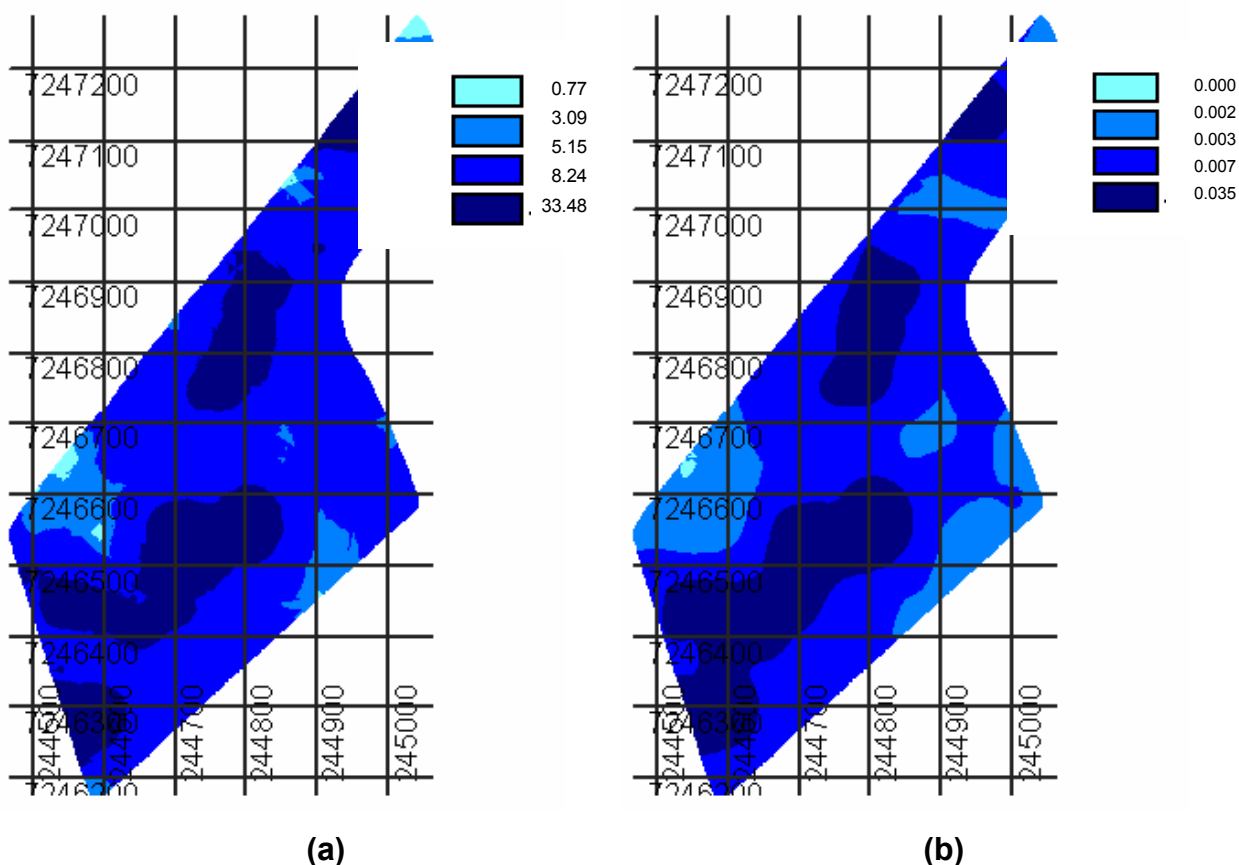


Figura 44 - Mapas dos atributos hídricos do solo (cm s^{-1}), Condutividade Hidráulica (a) e Infiltração da Água no Solo (mm h^{-1}) (b)

A Figura 45 apresenta o mapa temático para a produtividade da soja. Observa-se que a produtividade foi menor (entre 1,760 e 3,095 t ha^{-1}) nas duas extremidades inferior e superior. Neste local existe um tráfego de maquinário agrícola maior, pois é aí o local em que é feito o retorno do maquinário, devido ao tráfego parte da plantação pode ter sido destruída. A produtividade parece

ser maior (entre 4,225 e 5,890 t ha⁻¹) nas regiões em que a macroporosidade e porosidade total são maiores.

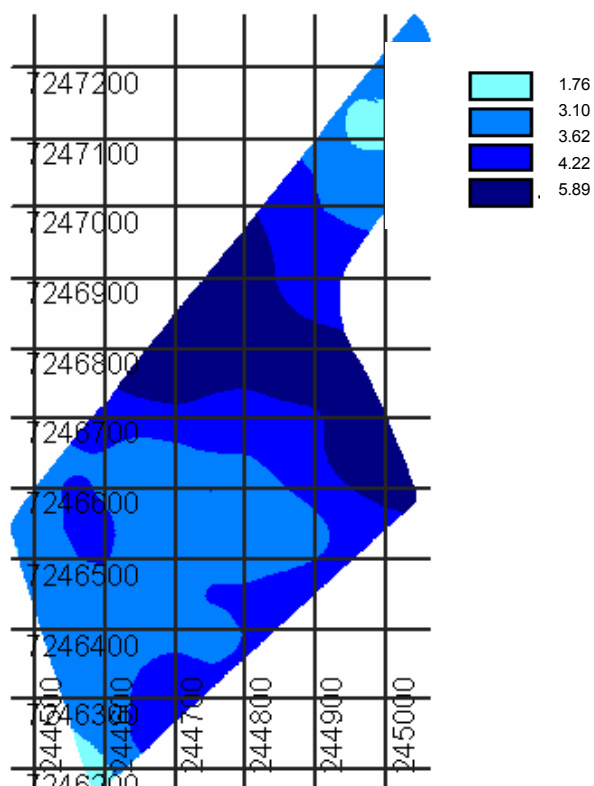


Figura 45 - Mapa da Produtividade da Soja (t ha⁻¹)

Para um estudo mais detalhado sobre correlação da produtividade da soja e dos atributos físico-hídricos é necessário um estudo mais detalhado que é apresentado a seguir.

5 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS EM ESTUDO E DA PRODUTIVIDADE DA SOJA

5.1 Correlação Linear de Pearson

TABELA 8 - Resultados da análise do coeficiente linear de Pearson para os atributos em estudo e da produtividade da soja

	Prod.	Ds A	Ds B	Mi A	Mi B	Ma A	Ma B	Pt A	Pt B	k	l
Prod.	1										
Ds A	-0,23	1									
ρ	0,019										
Ds B	N	+0,43	1								
ρ		0,000									
Mi A	N	N	N	1							
ρ											
Mi B	N	N	N	N	1						
ρ											
Ma A	+0,20	-0,72	-0,31	-0,59	N	1					
ρ	0,049	0,000	0,001	0,000							
Ma B	N	-0,31	-0,54	N	-0,45	+0,35	1				
ρ		0,001	0,001		0,000	0,000					
Pt A	+0,23	-1	-0,43	N	N	+0,72	+0,031	1			
ρ	0,021	0,00	0,000			0,000	0,001				
Pt B	N	-0,31	-0,68	N	+0,28	+0,30	+0,71	+0,31	1		
ρ		0,001	0,000		0,002	0,001	0,000	0,001			
K	N	N	N	N	N	N	N	N	N	1	
ρ											
l	N	N	N	N	N	N	N	N	N	+0,95	1
ρ										0,000	

Nota: N: não existe correlação linear; ρ : p-valor ao nível de 5% de significância; Prod.: produtividade da soja; Ds A: densidade do solo (0 – 10 cm); Ds B: densidade do solo (10 – 20 cm); Mi A: microporosidade (0 – 10 cm); Mi B: microporosidade (10 – 20 cm); ma A: macroporosidade (0 – 10 cm); Ma B: macroporosidade (10 – 20 cm); Pt A: porosidade total (0 – 10 cm); Pt B: porosidade total (10 – 20 cm); k: condutividade hidráulica; l: infiltração da água no solo.

Para os atributos correlacionados, nota-se que os atributos físicos do solo: densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total estão correlacionados linearmente entre si. Existe uma alta correlação linear positiva entre os atributos hídricos do solo que já havia sido detectada nos

mapas temáticos. A produtividade da soja está correlacionada positivamente com os atributos macroporosidade e porosidade total na profundidade 0 - 10 cm e negativamente correlacionada com a densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm. Não foi detectada correlação linear entre os atributos físicos e hídricos do solo. Os resultados da análise são mostrados na Tabela 8.

5.2 Correlação Não Paramétrica de Spearman

TABELA 9 - Resultados da análise do coeficiente não paramétrico de Spearman para os atributos em estudo e da produtividade da soja

	Prod.	Ds A	Ds B	Mi A	Mi B	Ma A	Ma B	Pt A	Pt B	k	l
Prod.	1										
Ds A	-0,22	1									
ρ	0,03										
Ds B	N	+0,5	1								
ρ		0,007									
Mi A	N	N	N	1							
ρ											
Mi B	N	N	N	0,26	1						
ρ				0,006							
Ma A	N	-0,79	-0,42	-0,41	N	1					
ρ		0,000	0,000	0,000							
Ma B	N	-0,32	-0,50	-0,19	-0,43	+0,40	1				
ρ		0,000	0,000	0,047	0,000	0,000					
Pt A	+0,21	-1	-0,50	N	N	+0,79	+0,33	1			
ρ	0,039	0,00	0,000			0,000	0,000				
Pt B	N	-0,37	-0,68	N	+0,20	+0,37	+0,75	+0,37	1		
ρ		0,000	0,000		0,037	0,000	0,000	0,000			
K	N	N	N	N	N	N	N	N	N	1	
ρ											
l	N	N	N	N	N	N	N	N	N	+0,94	1
ρ										0,000	

Nota: N: não existe correlação linear; ρ : p-valor ao nível de 5% de significância; Prod.: produtividade da soja; Ds A: densidade do solo (0 – 10 cm); Ds B: densidade do solo (10 – 20 cm); Mi A: microporosidade (0 – 10 cm); Mi B: microporosidade (10 – 20 cm); ma A: macroporosidade (0 – 10 cm); Ma B: macroporosidade (10 – 20 cm); Pt A: porosidade total (0 – 10 cm); Pt B: porosidade total (10 – 20 cm); k: condutividade hidráulica; l: infiltração da água no solo.

A Tabela 9 apresenta os coeficientes não paramétricos de Spearman. Observa-se que a densidade do solo nas duas profundidades estudadas estão

correlacionadas com a macroporosidade e com a porosidade total do solo, também nas duas profundidades estudadas. A produtividade da soja está correlacionada positivamente com a densidade do solo e com a porosidade total do solo, ambas na profundidade 0 – 10 cm. Nota-se também que os atributos físicos do solo não estão correlacionados com os atributos hídricos em estudo. Também não foi detectada correlação entre a produtividade da soja com os atributos hídricos. Houve uma forte correlação positiva entre a condutividade hidráulica e a infiltração da água no solo.

5.3 Correlação Espacial

TABELA 10 - Coeficientes de correlação espacial para os atributos em estudo e da produtividade da soja

	Prod.	Ds A	Ds B	Mi A	Mi B	Ma A	Ma B	Pt A	Pt B	k	l
Prod.	1										
Ds A	-0,777	1									
Ds B	N	+0,425	1								
Mi A	+0,349	-0,0009	-0,0001	1							
Mi B	-0,011	N	-0,0003	N	1						
Ma A	N	-0,0005	N	N	N	1					
Ma B	+0,170	-0,0003	-0,0005	N	-0,001	N	1				
Pt A	+0,641	-0,0005	N	+0,0003	N	N	N	1			
Pt B	+0,530	-0,0003	-0,0007	N	+0,001	N	N	N	1		
k	N	N	N	N	N	N	N	N	N	1	
l	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	1

Nota: N: não existe correlação linear; Prod.: produtividade da soja; Ds A: densidade do solo (0 – 10 cm); Ds B: densidade do solo (10 – 20 cm); Mi A: microporosidade (0 – 10 cm); Mi B: microporosidade (10 – 20 cm); ma A: macroporosidade (0 – 10 cm); Ma B: macroporosidade (10 – 20 cm); Pt A: porosidade total (0 – 10 cm); Pt B: porosidade total (10 – 20 cm); k: condutividade hidráulica; l: infiltração da água no solo.

A Tabela 10 apresenta os resultados da correlação espacial dos atributos em estudo. Observa-se que os atributos densidade do solo, nas duas profundidades estudadas estão diretamente correlacionados espacialmente. Esse atributo possui correlação espacial inversa com os outros atributos físicos do solo (microporosidade, macroporosidade e porosidade total) e não possui correlação com os atributos hídricos (infiltração da água no solo e condutividade hidráulica). Destaca-se aqui a correlação espacial inversa entre

a produtividade da soja e a densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm e a correlação espacial direta entre este atributo com a porosidade total nas duas profundidades. A produtividade da soja está ainda correlacionada diretamente com os atributos microporosidade (0 – 10 cm) e macroporosidade (10 –20 cm). Não foi detectada correlação espacial entre a produtividade da soja com os atributos hídricos em estudo, nem entre os atributos hídricos.

As Figuras 46 a 49 apresentam os semivariogramas cruzados para os atributos que tiveram correlação espacial entre si, os demais semivariogramas estão apresentados no anexo Q.

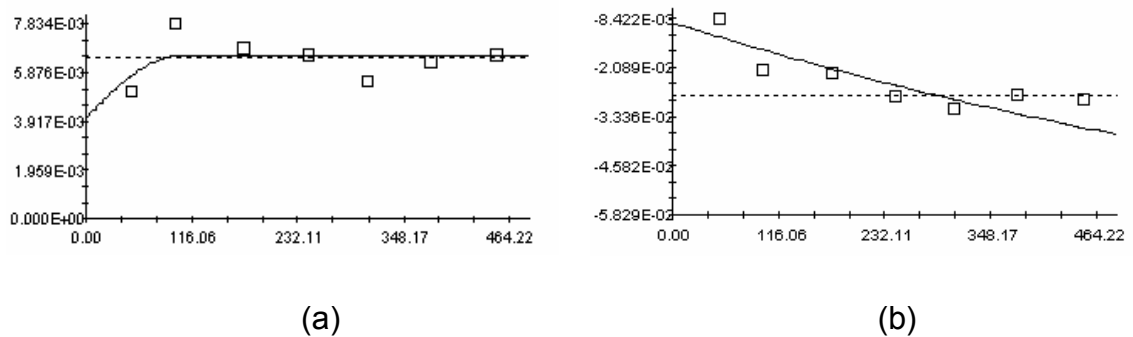


Figura 46 - Semivariograma cruzado para a Densidade do Solo nas duas profundidades estudadas (a) e para a Densidade do Solo (0 – 10 cm) e a Produtividade (b)

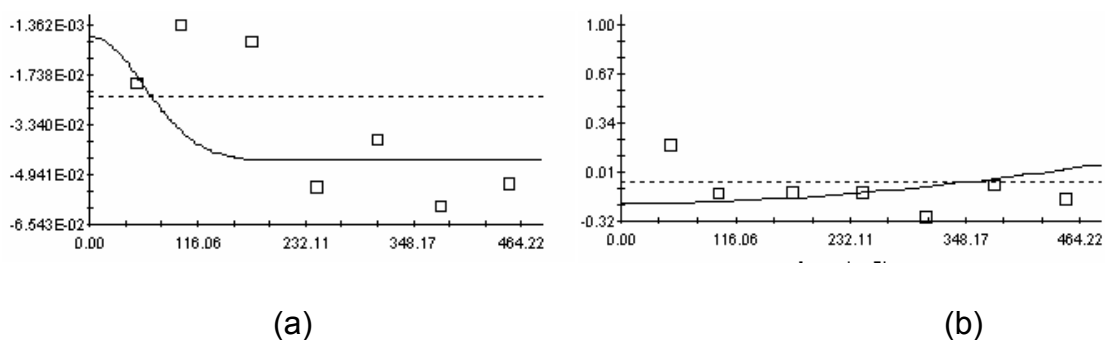


Figura 47 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e densidade do solo (10 –20 cm) (a) e para a microporosidade (0 - 10 cm) e a produtividade (b)

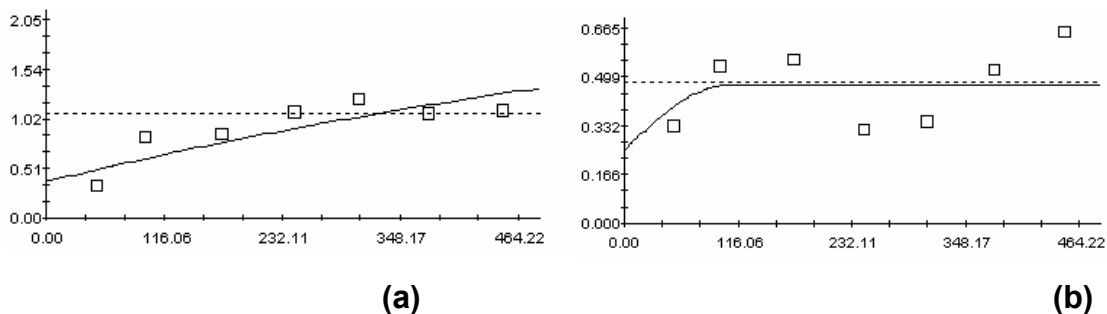


Figura 48 - Semivariograma cruzado para a Porosidade Total (0 – 10 cm) e Produtividade (a) e para a Macroporosidade (10 –20 cm) e a Produtividade (b)

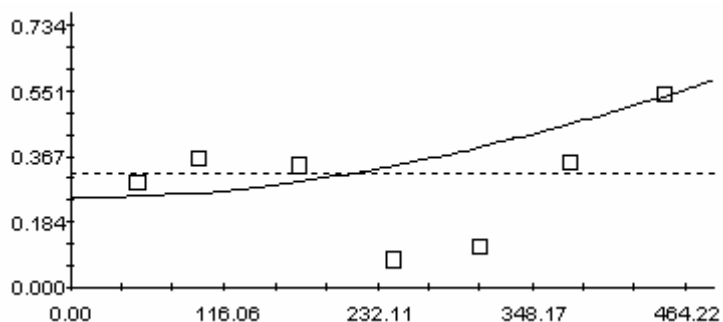


Figura 49 - Semivariograma cruzado para a Porosidade Total (10 –20 cm) e a Produtividade

O modelo ajustado para o semivariograma cruzado da densidade do solo nas duas profundidades estudadas foi o esférico (Figura 46a) e o alcance encontrado foi de 98,50 m, o alcance neste caso é o raio de correlação espacial entre os dois atributos. Para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a produtividade (Figura 46b) o modelo ajustado foi o exponencial e o alcance encontrado foi de 1010,90 m. Para os atributos microporosidade (0 – 10 cm) e densidade do solo (10 –20 cm), (Figura 47a) o modelo ajustado foi o gaussiano e o alcance encontrado foi de 82,00 m e para os atributos microporosidade (0 - 10 cm) e produtividade o modelo de semivariograma cruzado ajustado foi o

gaussiano, o alcance encontrado foi de 1010,90m (Figura 47b). Para os atributos porosidade total (0 – 10 cm) e produtividade o modelo ajustado foi o modelo exponencial e o alcance encontrado foi de 928,00 m (Figura 48a). Para a macroporosidade (10 – 20 cm) e produtividade o modelo ajustado ao semivariograma cruzado foi o esférico e o alcance encontrado foi de 107,30 m (Figura 48b). O modelo de semivariograma cruzado ajustado para os atributos porosidade total (10 – 20 cm) e produtividade foi o gaussiano e o alcance encontrado foi de 1010,90 m (Figura 49). Os raios de correlação espacial estão apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 - Alcances (m) encontrados dos semivariogramas cruzados para os atributos em estudo e da Produtividade da Soja

	Prod.	Ds A	Ds B	Mi A	Mi B	Ma A	Ma B	Pt A	Pt B	k	l
Prod.											
Ds A	1010,90										
Ds B	N	98,50									
Mi A	1010,90	N	82,00								
Mi B	N	N	N	N							
Ma A	N	N	N	N	N						
Ma B	107,30	N	N	N	N	N					
Pt A	928,00	N	N	N	N	N	N				
Pt B	1010,90	N	N	N	N	N	N	N			
k	N	N	N	N	N	N	N	N	N		
l	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	

Nota: N: não existe correlação linear; Prod.: produtividade da soja; Ds A: densidade do solo (0 – 10 cm); Ds B: densidade do solo (10 – 20 cm); Mi A: microporosidade (0 – 10 cm); Mi B: microporosidade (10 – 20 cm); ma A: macroporosidade (0 – 10 cm); Ma B: macroporosidade (10 – 20 cm); Pt A: porosidade total (0 – 10 cm); Pt B: porosidade total (10 – 20 cm); k: condutividade hidráulica; l: infiltração da água no solo.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa, sobre os atributos físicos e hídricos do solo e da produtividade da soja, permitem concluir que:

O espaçamento de 50 m utilizados entre os pontos amostrais permitiu detectar dependência espacial moderada entre todos os atributos em estudo com exceção da densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm que apresenta independência entre as amostras, segundo semivariograma experimental.

A dependência espacial verificada através da construção de envelopes mostrou que os atributos microporosidade (10 - 20 cm), infiltração da água no solo e produtividade apresentaram dependência espacial, os demais atributos apresentaram fraca dependência espacial.

Os mapas temáticos revelaram que os atributos hídricos possuem forte correlação entre si. O mapa temático da produtividade mostrou que parece haver uma correlação entre os atributos macroporosidade e porosidade total nas duas profundidades estudadas com a produtividade da soja.

No estudo da correlação linear entre os atributos o coeficiente de correlação linear de Pearson mostrou que os atributos físicos do solo: densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total estão correlacionados entre si. Também confirmou uma alta correlação entre os atributos hídricos, já detectada nos mapas temáticos. Em relação à produtividade da soja o coeficiente linear de Pearson mostrou que esse atributo está correlacionado positivamente com os atributos macroporosidade e porosidade total na profundidade 0 – 10 cm e negativamente correlacionado com a densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm.

Conforme a correlação não paramétrica de Spearman, existe correlação positiva entre a produtividade da soja e a densidade do solo e com a porosidade total do solo, ambas na profundidade 0 – 10 cm. Não foi detectada

correlação entre a produtividade da soja com os atributos hídricos. Houve correlação não paramétrica positiva entre os atributos hídricos em estudo.

O estudo da correlação espacial revelou que a produtividade da soja possui correlação diretamente proporcional com a porosidade total do solo nas duas profundidades estudadas e correlação inversamente proporcional com a densidade do solo na profundidade (0 – 10 cm), revelou também que os atributos hídricos não possuem correlação espacial entre si e nem correlação com a produtividade.

Este estudo poderá servir de ferramenta para um aumento na produtividade, pois ao saber que a produtividade está correlacionada, por exemplo, com a porosidade total e com a densidade do solo o agricultor poderá desenvolver técnicas para conservar ou mudar este atributo.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de argissolo**. Santa Maria, 2000. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria.

AGUIAR, A. B. de. **O Emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. Rio de Janeiro, RJ, 2001, 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ANTUNES, J. M. **Rendimento da soja aumenta 25 Kg/ha ao ano**. EMBRAPA Soja, outubro, 2004. Disponível em: ww.cnpso.embrapa.br/noticias. Acesso em: 12 de outubro de 2004.

AZEVEDO, A. C. D.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria, RS: Palloti, 2004. 100 p.

BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba, SP: Esalq, 2002. 349 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo: Cone, 1990.

BOUWER, H. Intake rate: cylinder infiltrometer: field methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soils analysis**. Part 1 – Physical and mineralogical methods. Madison, WI: ASA and SSSA publisher, 1986.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science Publishers, 1979. 129 p.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1993. 900 p.

CRESSIE, N. A.; HAWKING, D. M. Robust estimation of the variogram. **Mathematical Geology**. New York, v. 12, p. 115-25, 1980.

DAFONTE, J. D.; VALCÁRCEL, M. A., NEIRA, X. X. S.; GONZÁLEZ, A. P. **Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con Permeámetro Guelph**. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo, Santiago de Compostela, España: R. Muñoz-Carpena, 1999. p. 5-10.

EASTMAN, J. R. **Idrisi 3.2 Software**. Clark University. The Clark Labs Idrisi Project. Worcester: George Perkins Marsh Institute, 1999.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; BAUMGARTNER, K. A.; BRASHAW, K. L. In-situ measurements of hydraulic properties of using Guelph permeameter and Guelph infiltrometer. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LAND DRAINAGE, 3. **Proceedings...** Ohio State University, 1987. G13-G23.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN Y. K. S. Hydraylic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Ground Water Monitoring Review.**, Summer, v. 9: p. 184-193, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

GOMES, F. P. **Estatística moderna na agropecuária**. 14 ed. Piracicaba - SP: Nobel, 1987. 477 p.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo, ao longo de uma transeção em área irrigada por pivô central. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24.1995, Viçosa - MG: **Anais...** Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. 1 CD-ROOM.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Sucessão de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 153-159, 2000.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. 1988. 145 p.

HAMLETT, J. M.; HORTON, R.; CRESSIE, N. A. C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. **Soil Science Society of America Journal**. v. 50, p. 868 –875, 1986.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R; ALVES JUNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 21, n. 4, p. 1-12, 1997.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A .U.; SOUZA, E. G. de; ROCHA, J. V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em uma área experimental de agricultura de precisão com e sem manejo localizado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 8 n. 2/3, p. 212-219, 2004.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M.A .U.; SOUZA, E. G. de; ROCHA, J. V. Modelagem da correlação espacial entre mapas de produtividade da soja e mapas de atributos do solo por meio de análise de componentes principais. **Revista Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA**, Jaboticabal - SP, v. 22, n. 3, p. 383-390, 2002.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil Physics**. John Wiley & Sons INC. Cidade, 1991. 328 p.

KIEHL, E. Y. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo - SP: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KILPP, A. R. Fieldstar. Atual estágio de utilização no Brasil. In: _____. BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba, SP: Esalq, 2002. p. 10-15.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998.

LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: Trouble or new paradigm? **Ecology**, New York. v. 74, p. 1659-1673, 1993.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba - SP: P. L. Libardi, 2000. 509 p.

LOPES, P. A. **Probabilidades e estatística**. Rio de Janeiro - RJ: Reichmann & Affonso Editores. 1999. 174 p.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic geology**. El Paso, v. 58, p. 1246-1266, 1964.

MELO FILHO J. F. **Variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em função da umidade de um latossolo sob condições de campo**. Piracicaba, SP, 129 f. 2002. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MERCANTE, E.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G. de. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Cascavel, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

MILANI, D. I. C. **Variabilidade espacial da infiltração da água no solo e correlação com parâmetros físicos e produtividade do milho**. Cascavel - PR. 119 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná,

MUCELIM, N. I. S. **Variabilidade Espacial de Atributos Físico-hídricos e do Rendimento de Grãos de Soja em um Latossolo Vermelho Sob Sistema Plantio Direto e Convencional**. Cascavel, PR - 102 f. 2004. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

NOLLA, D. **Erosão do solo: o grande desafio**. Porto Alegre: Secretaria de Estado da Agricultura, Divisão de Divulgação e Informação Rural, 1982. 412 p.

PANNATIER, Y. **Variowin 2.2: Software for Spatial Data Analysis in 2D**. New York: Springer, 1996. 91 p.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. Piracicaba, SP, 167 f. 1995. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

QUEIROZ, J. E.; MENDONÇA, I. C.; SANTOS, R. V. Um estudo comparativo entre dois procedimentos de cálculo da condutividade hidráulica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 113-115, 1997.

RADCLIFFE, D. E.; RASMUSSEN, T. C. Soil water movement. In: SUMNER, M. E. **Handbook of soil science**. New York: CRC Press., p. 87-127, 2000.

REICHARDT, K **A água em sistemas agrícolas**. Piracicaba, SP: Manole, 1990, 188 p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ, 1996. 505 p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. São Paulo: Fundação Cargil, 1985. 91 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Baurer, SP: Manole, 2004. 478 p.

RESENDE, F. C.; SCALOPPI J. E. Avaliação de métodos para determinação das características de infiltração em sulcos. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, p. 227-233, 1985.

REYNOLDS W. D.; ELRICK, D. E. In-situ measurement of field – saturated hydraulic conductivity, sorptivity and parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985a.

_____. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the “Guelph permeameter”. CONFERENCE ON CHARACTERIZATION AND MONITORING OF THE VADOSE (UNSATURATED) ZONE, 1985, Denver, CO, **Proceedings...** Denver, CO: National Water Well Association 1985b.

_____. A method for simultaneous in situ measurement in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity pressure-head relationship. **Ground Water Monitoring Review.**, Summer, v. 6: p. 84-95, 1986. .

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; BAUM GARTNER, K. A.; BRASHAW, K. L. In-situ measurements of hydraulic properties of using Guelph permeameter and Guelph infiltrometer. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LAND DRAINAGE, 3. **Proceedings ...** Ohio State University, 1987.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. **A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table.**, Soil Science, v. 136 p.: 250-268. 1983.

REYNOLDS, W. D.; VIEIRA, S. R., TOPP, G. C. **Soil Moisture Equipment Corp. 2800 k1: operating instructions.** Soil Santa Barbara, CA: moisture equipment Corp, 1991. 27 p

RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** Piracicaba - SP. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P.J. **Geoestatistical software – geoR and geoRglm.** 2003.

SILVA, E. A. A.; OPAZO, M. A. U.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G.. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos de solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringá - UEM, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; LAMPARELLI, R. Programa computacional para produção e ajuste de modelos teóricos a semivariogramas experimentais em variáveis regionalizadas – GEOCAC. Cascavel, 2002. 1 CD ROM.

SMITH, D. **Surfer 6.0**. Surface mapping system. Golden, Colorado: 1997. 1 CD ROM

SOUZA, E. G.; RIBEIRO, S. R. A.; SILVA, M.; JOHANN, J. A.; MOLIN, J. P.; OPAZO, M. A. U.; NÓBREGA, L. H. P.; OLIVEIRA, R. F.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em um latossolo roxo distrófico da região de Cascavel - PR. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal - SP, v. 18, n. 3, p. 80-92, 1999.

STURARO, J. R. **Mapeamento geoestatístico de propriedades Geológico-Geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento**. São Carlos, 1995.177p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo.

TORRES, P. L. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina, PR Embrapa Soja, 1999. In: TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Uma Leitura Para os Temas Transversais: Ensino Fundamental**. Curitiba: SENAR – PR, 2003. p. 58.

TORRES, P. L.; ANDREOLI, C. V.; JLHENFELD, R. G. K.; FERREIRA, A. C.; PEGORINI, E. E.A Transversalidade e a Água. In: TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Uma Leitura Para os Temas Transversais: Ensino Fundamental**. Curitiba: SENAR – PR, 2003. p. 58.

VAN LIER, Q. J. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; et al. **Tópicos de Ciência do Solo**. Viçosa – MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBEA, v. 1, p. p.95-106. 2000,

VENDRUSCULO, L. G.; MAGALHÃES, P. S. G.; VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. Análise de Atributos de Solos Por Meio de Um Sistema Computacional Para Modelagem Geoestatística. In: _____. BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba, SP: Esalq, 2002. p. 90 – 97.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Curso de extensão universitária da Faculdade de Ciências Agrônômicas – Campus de Botucatu – UNESP, São Paulo, 1996. 166 p. (Apostila).

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**. Berkeley, v. 51 n. 3: p. 1-75, 1983.

XIANG, J. Improvements in evaluating constant-head permeameter test data. **Journal Hydrology**, v. 162, p. 77-97, 1994.

ANEXOS

ANEXO A

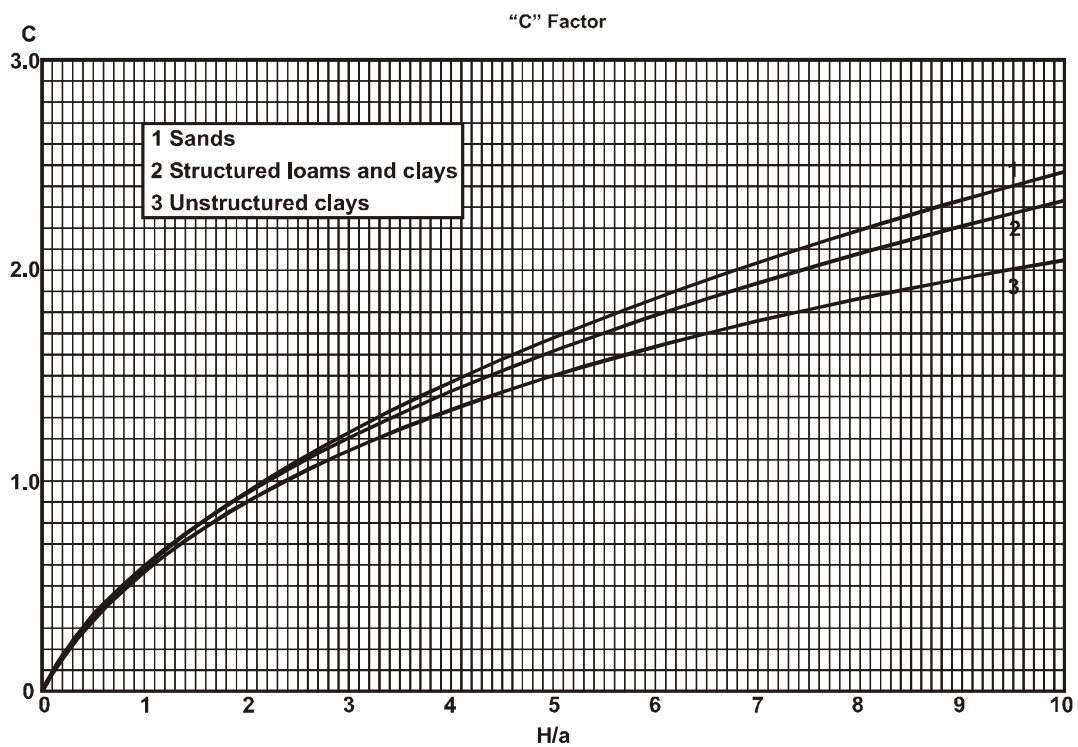


Figura 50 - Representação gráfica de Elrick

FONTE: ELRICK *et al.* (1987).

ANEXO B

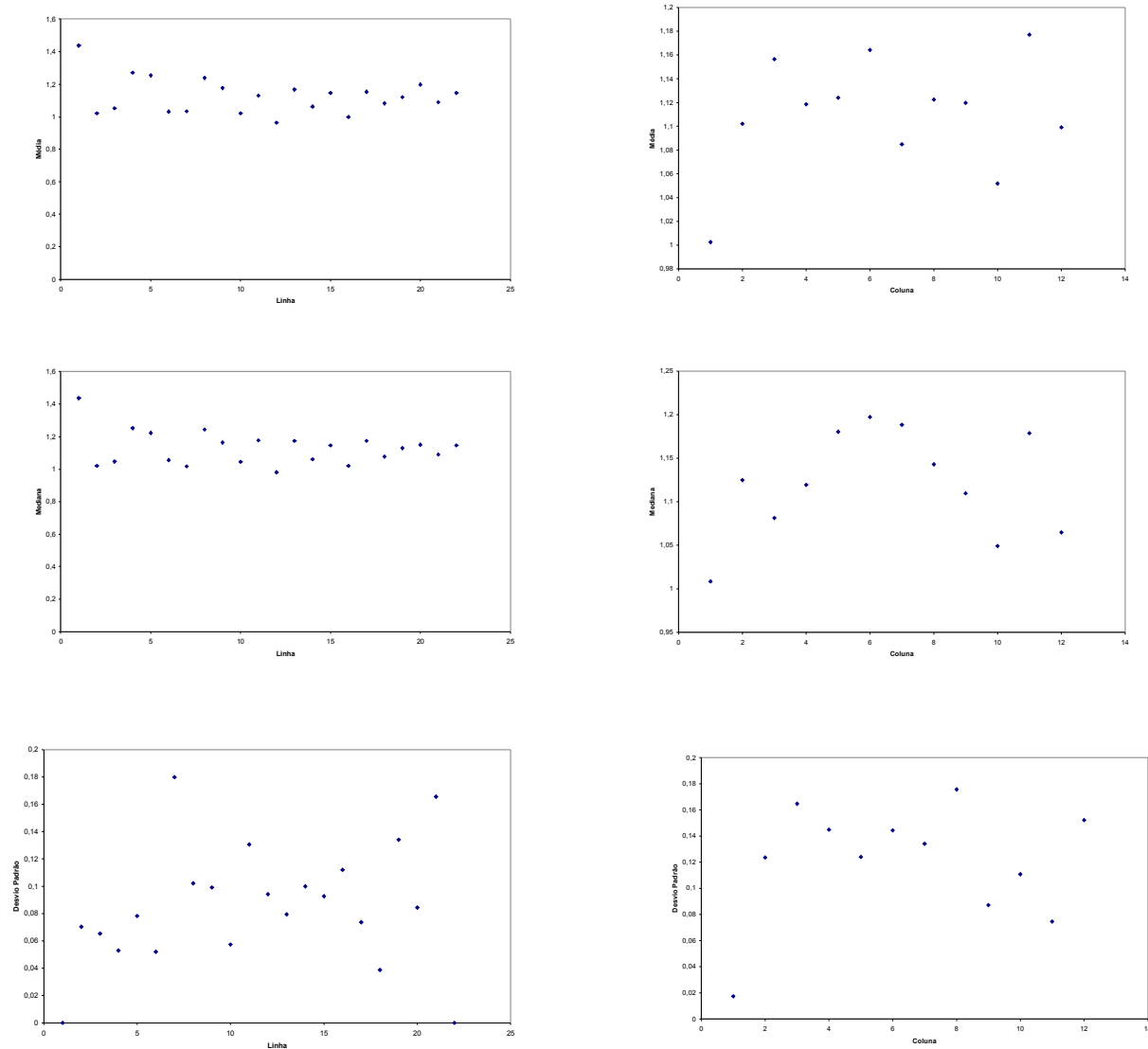


Figura 51 - Gráficos de dispersão para o atributo densidade do solo na profundidade 0 – 10 cm

ANEXO C

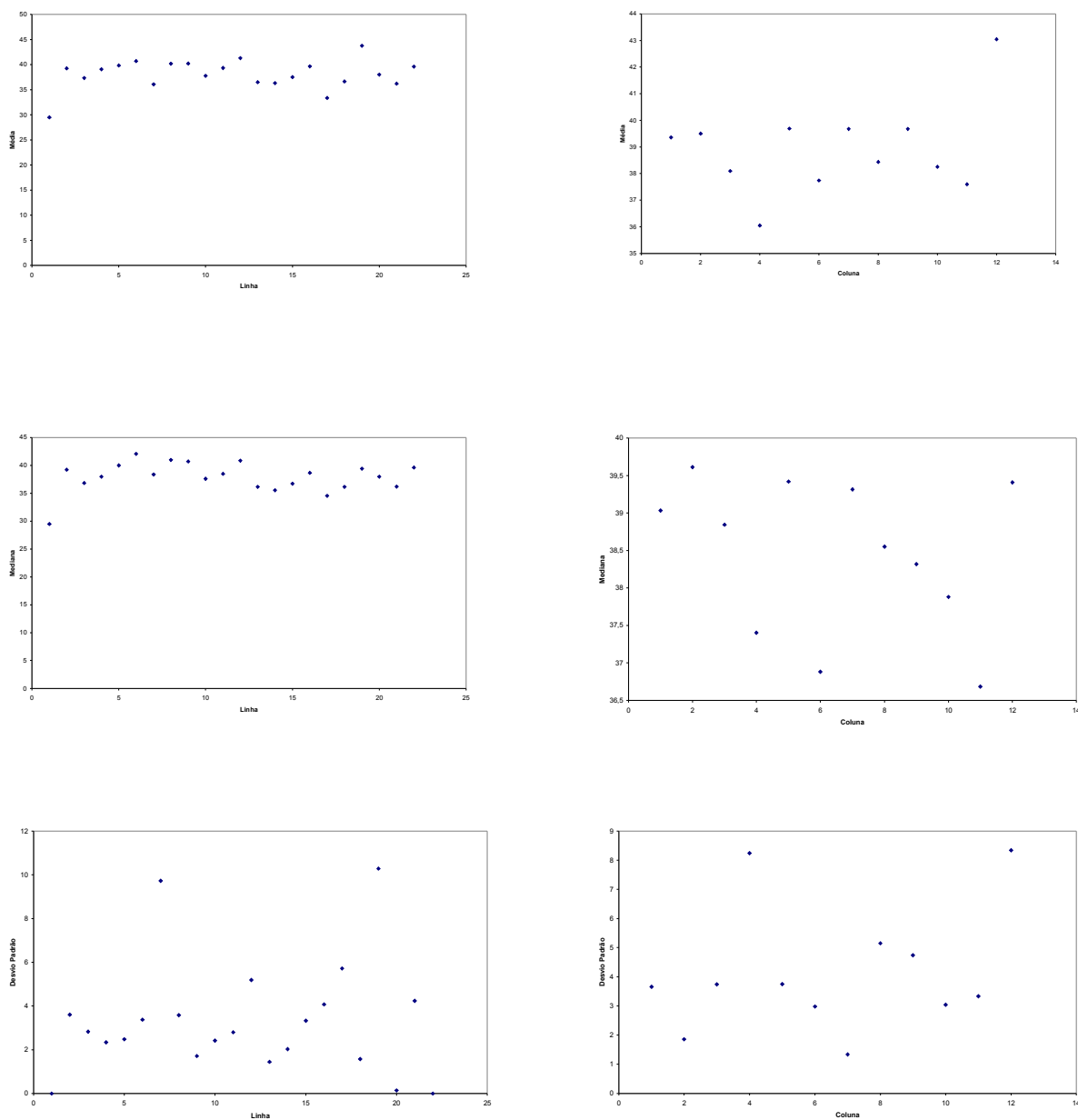


Figura 52 - Gráficos de dispersão para o atributo microporosidade do solo na profundidade 0 – 10 cm

ANEXO D

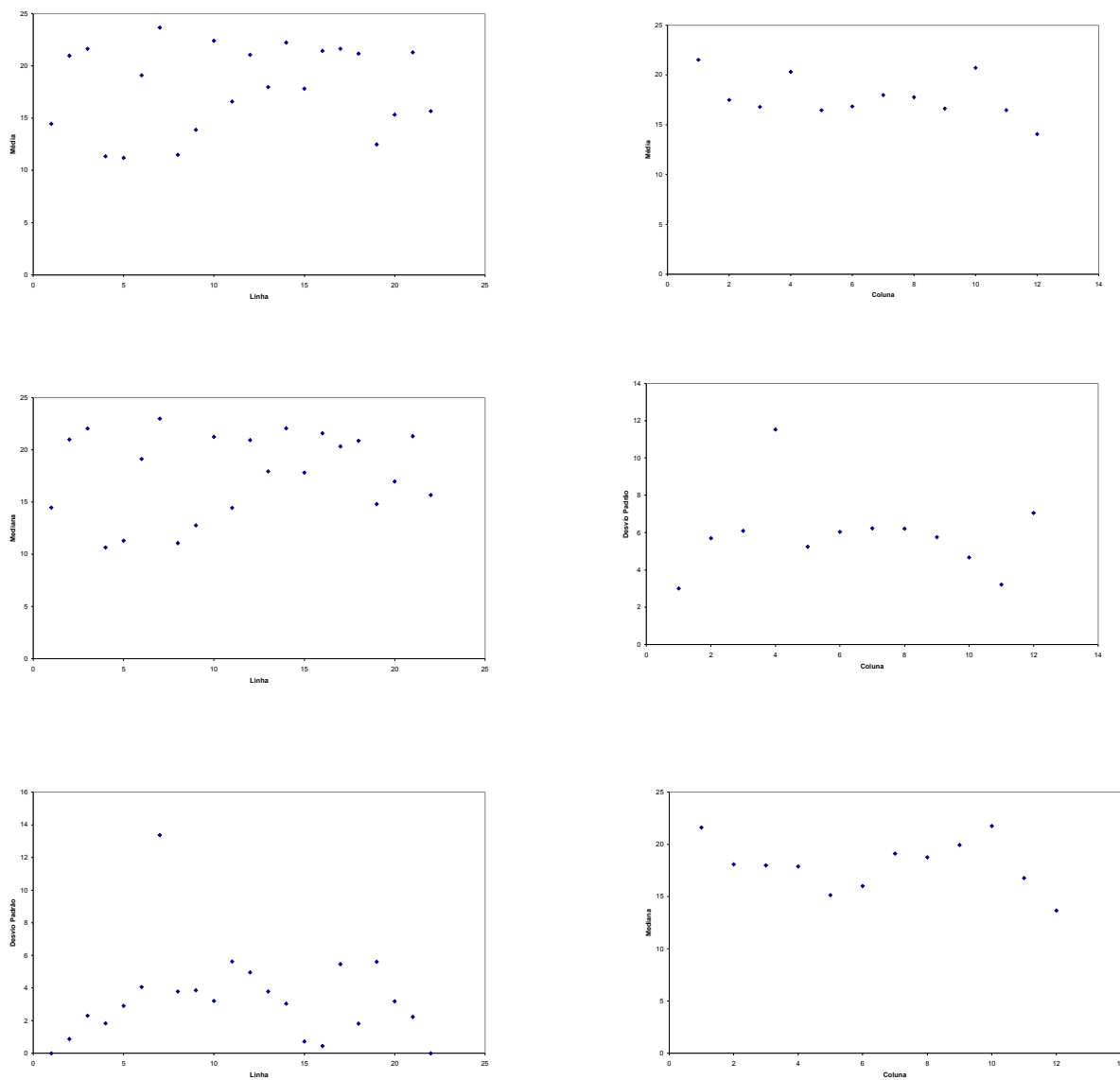


Figura 53 - Gráficos de dispersão para o atributo macroporosidade do solo na profundidade 0 – 10 cm

ANEXO E

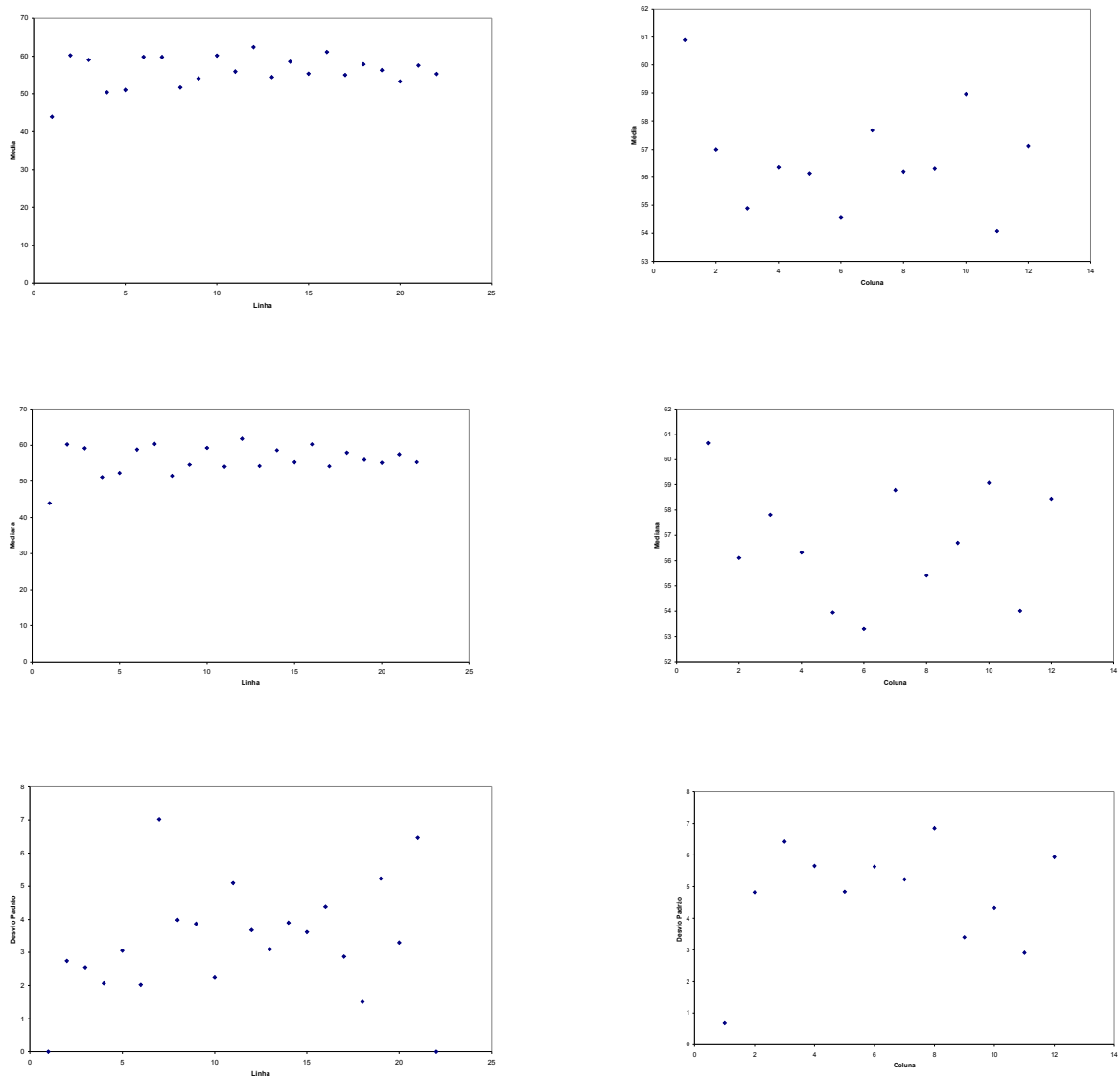


Figura 54 - Gráficos de dispersão para o atributo porosidade total do solo na profundidade 0 – 10 cm

ANEXO F

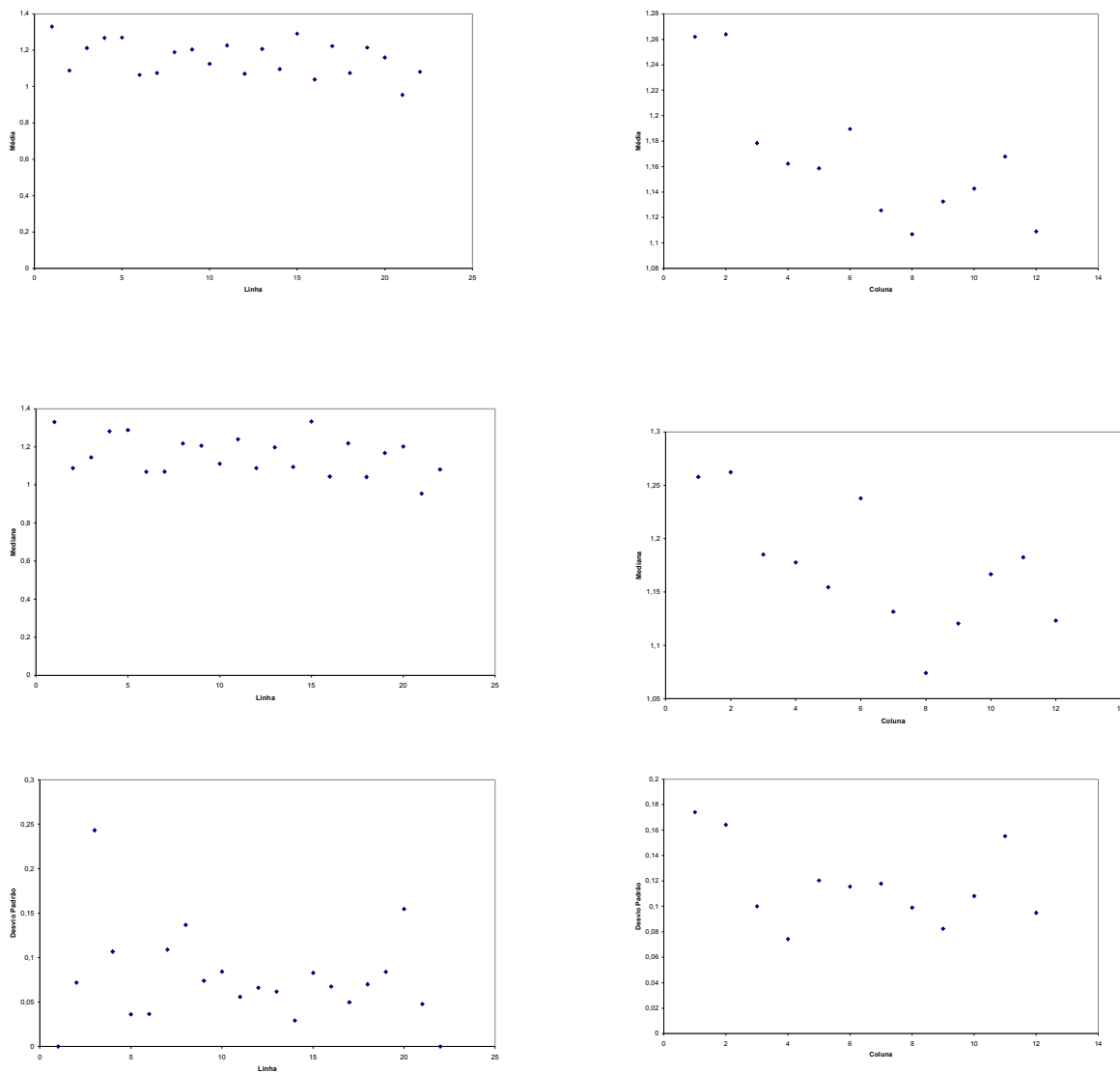


Figura 55 - Gráficos de dispersão para o atributo densidade do solo na profundidade 10 – 20 cm

ANEXO G

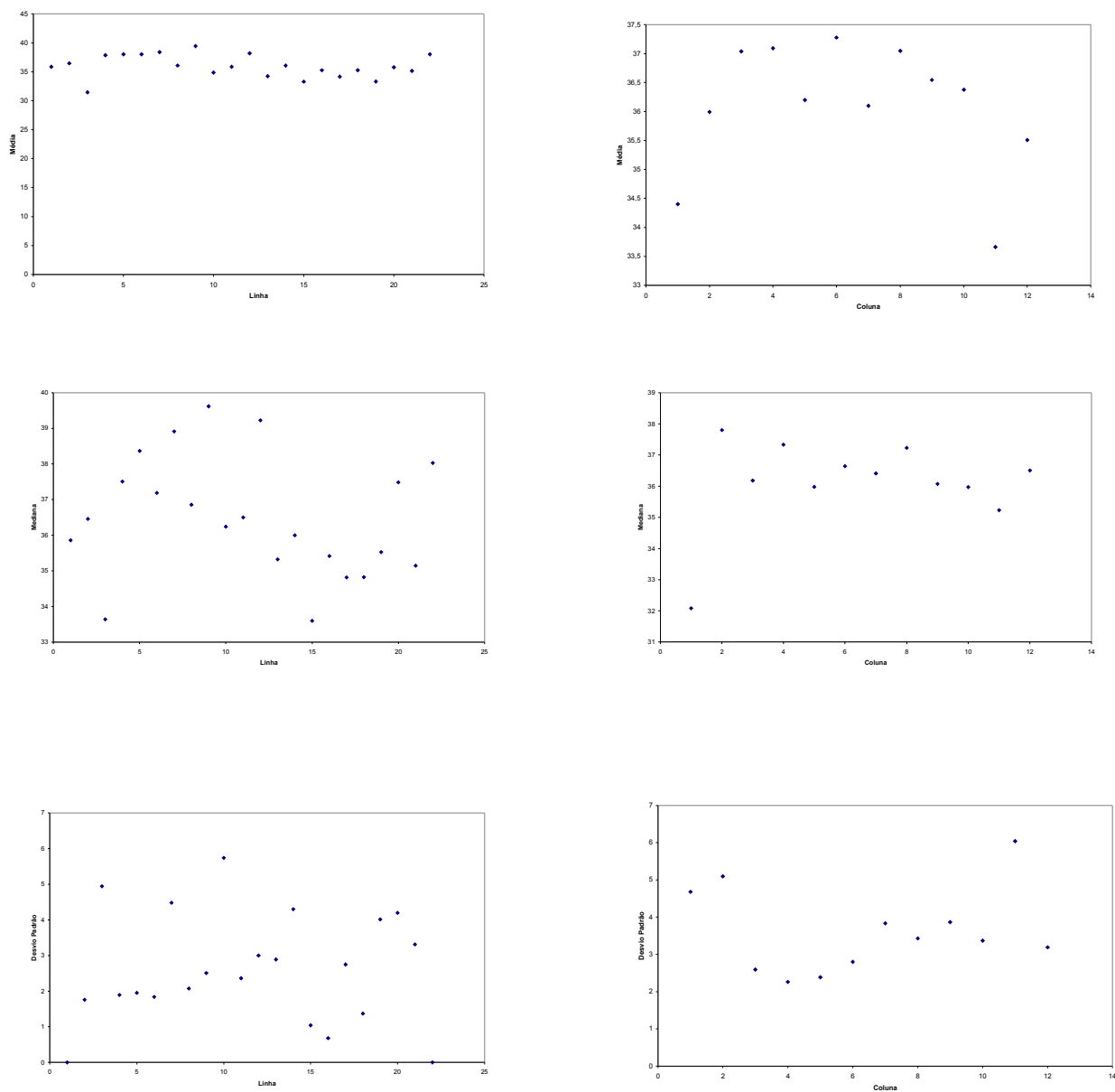


Figura 56 - Gráficos de dispersão para o atributo microporosidade do solo na profundidade 10 – 20 cm

ANEXO H

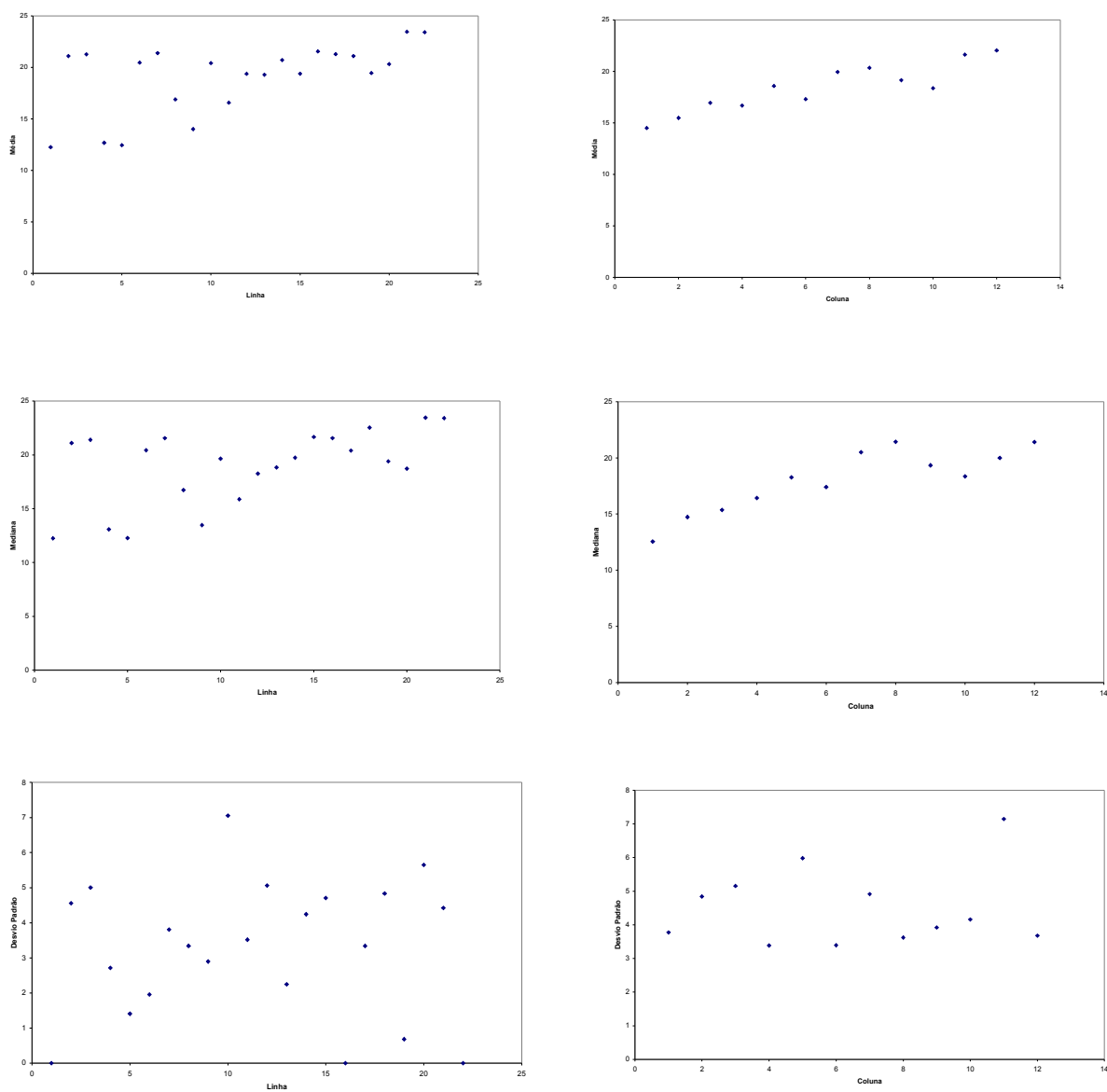


Figura 57 - Gráficos de dispersão para o atributo macroporosidade do solo na profundidade 10 – 20 cm

ANEXO I

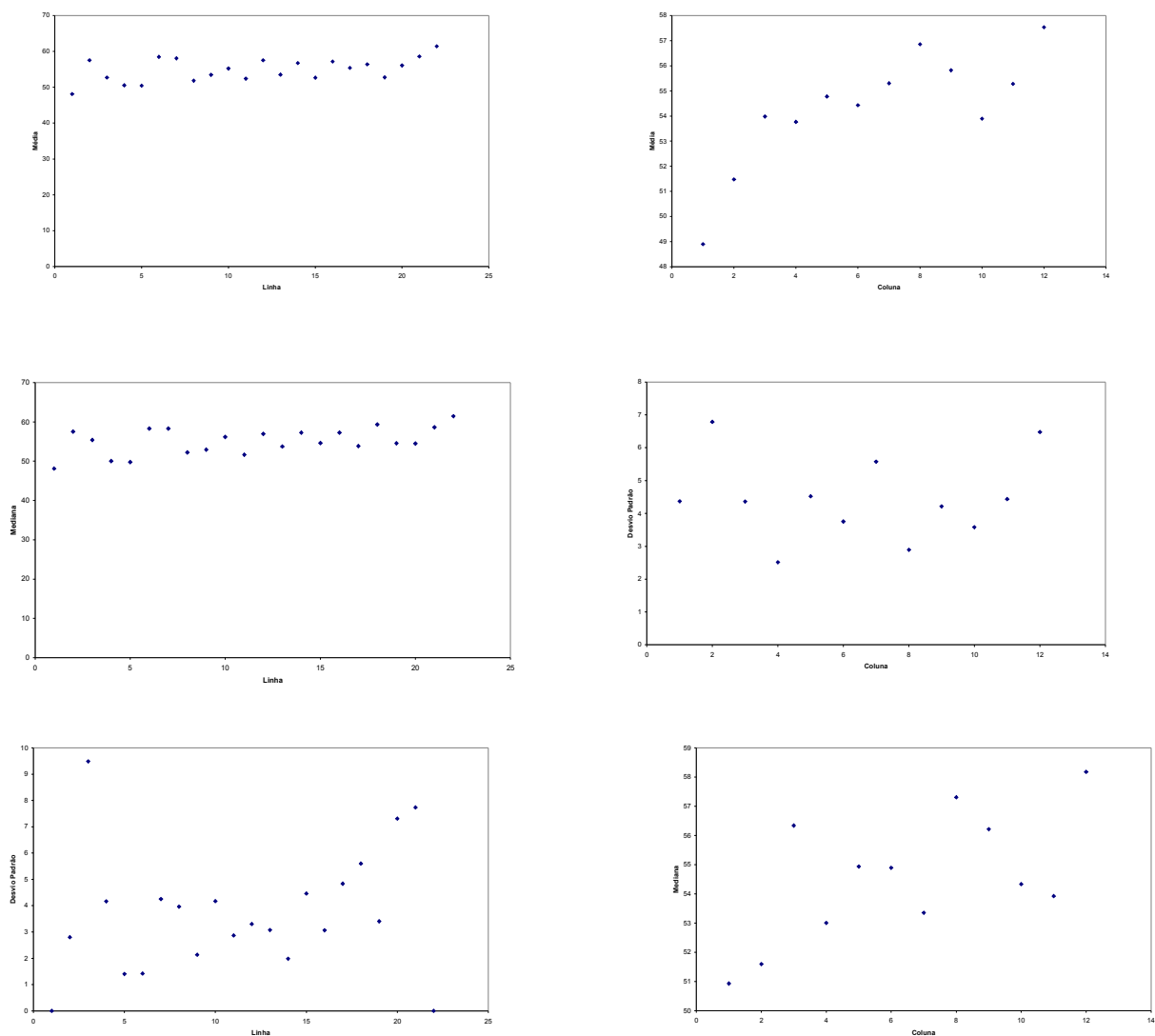


Figura 58 - Gráficos de dispersão para o atributo porosidade total do solo na profundidade 10 – 20 cm

ANEXO J

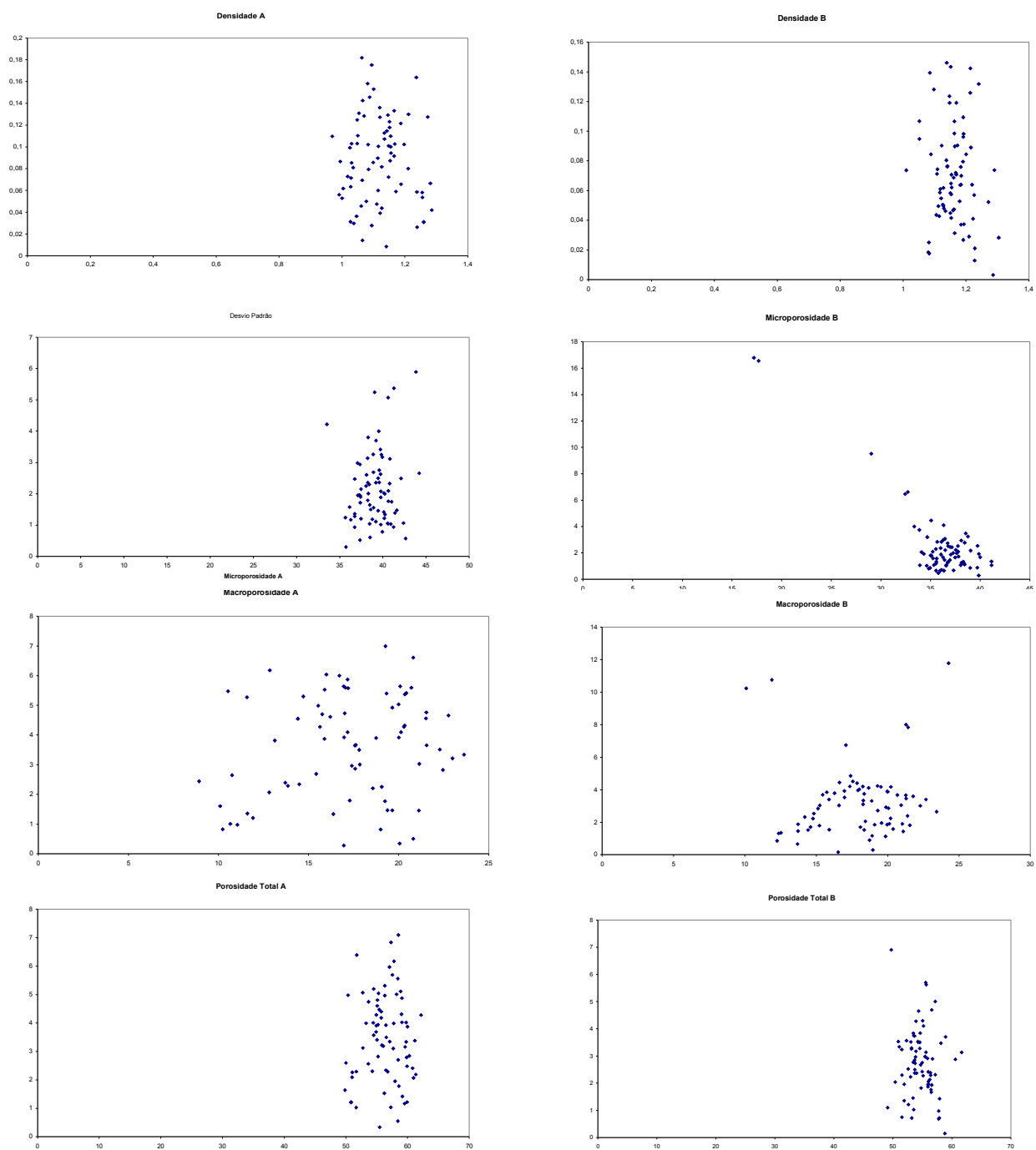


Figura 59 - Gráficos da média móvel *versus* desvio padrão para os atributos físicos do solo nas profundidades 0 – 10 cm (A) e 10 – 20 cm (B)

ANEXO K

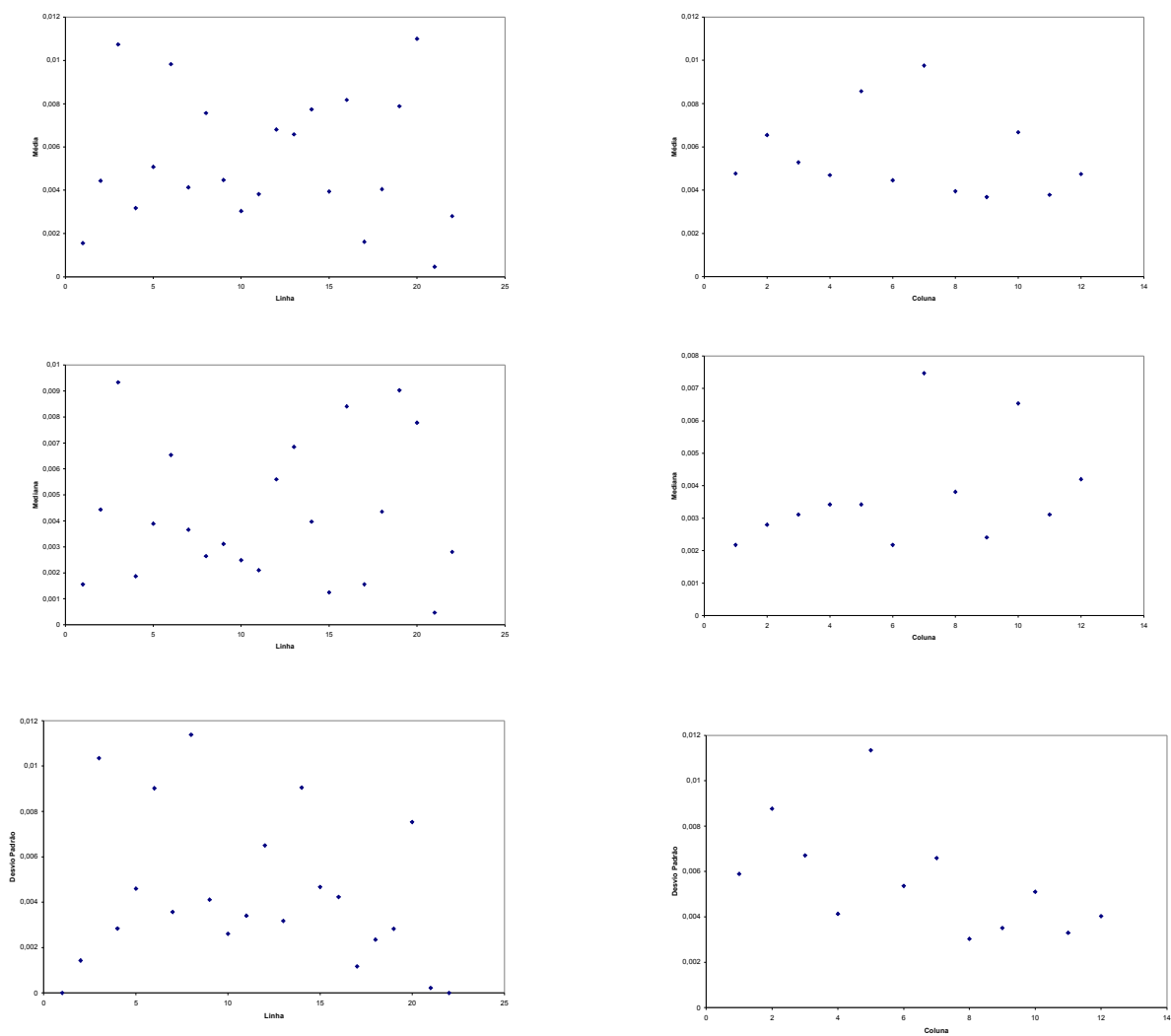


Figura 60 - Gráficos de dispersão para o atributo condutividade hidráulica

ANEXO L

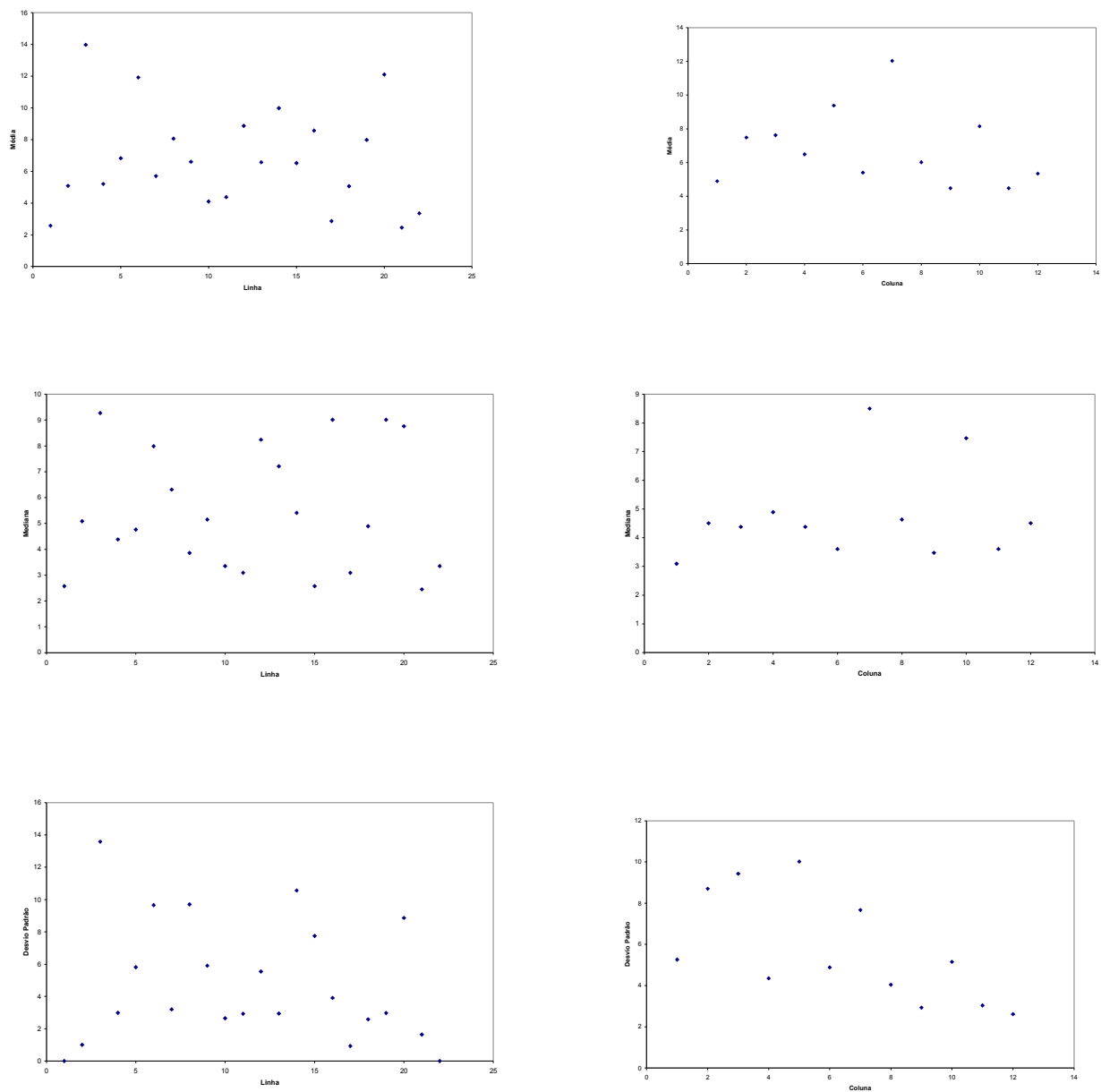


Figura 61 - Gráficos de dispersão para o atributo Infiltração da água no solo

ANEXO M

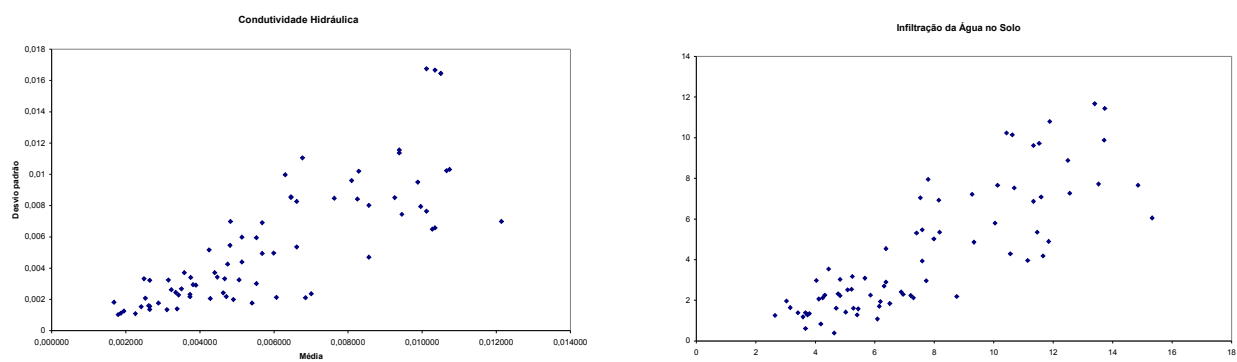


Figura 62 - Gráficos da média móvel *versus* desvio padrão para os atributos hídricos do solo

ANEXO N

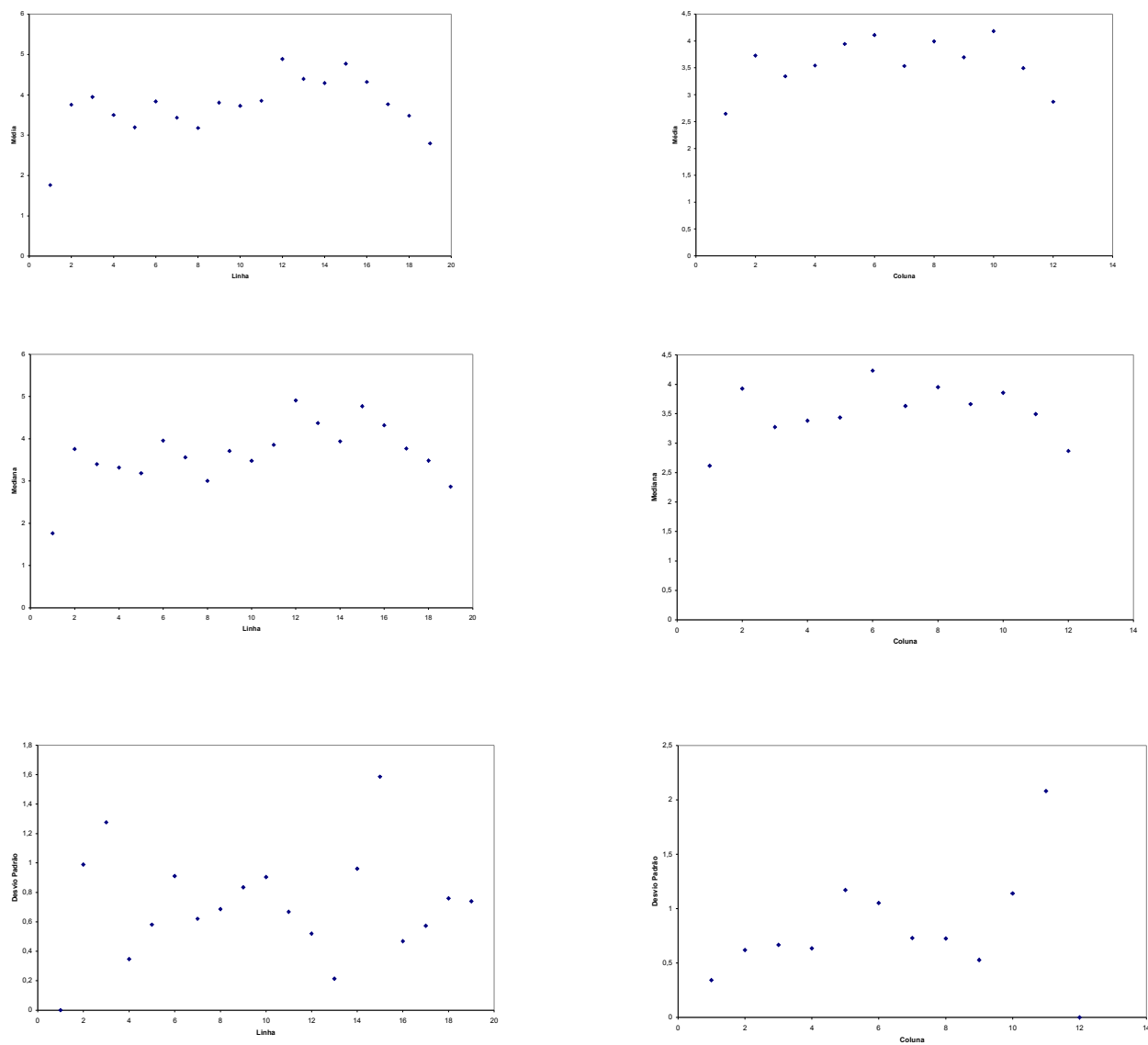


Figura 63 - Gráficos de dispersão para o atributo produtividade da soja

ANEXO O

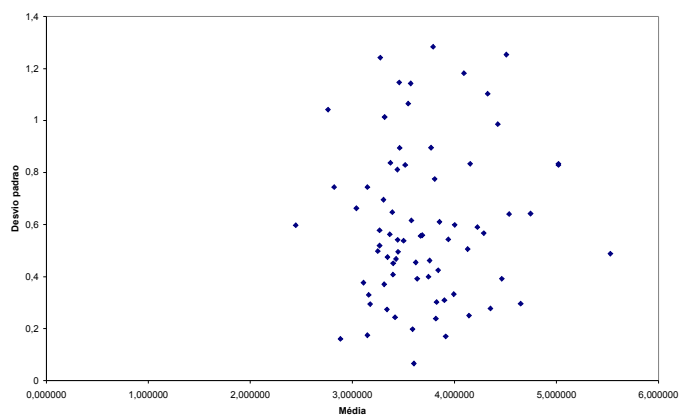
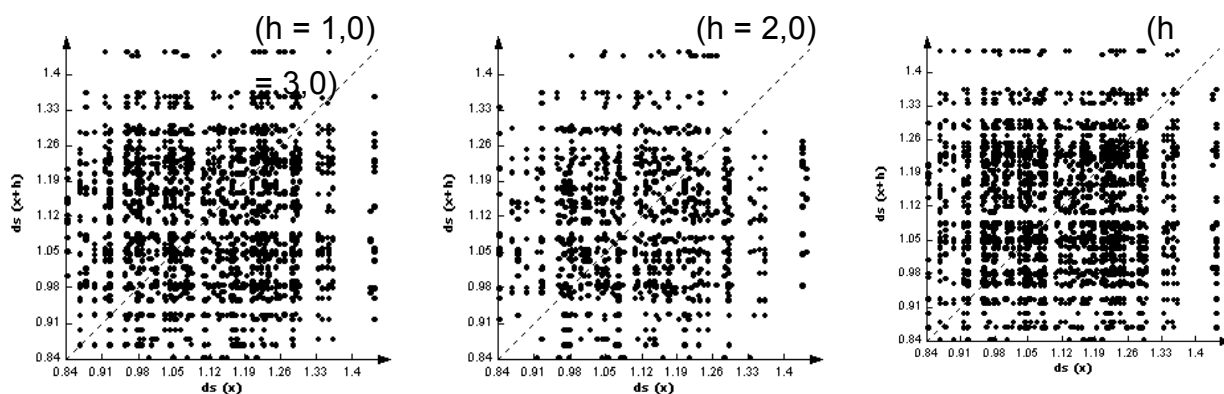
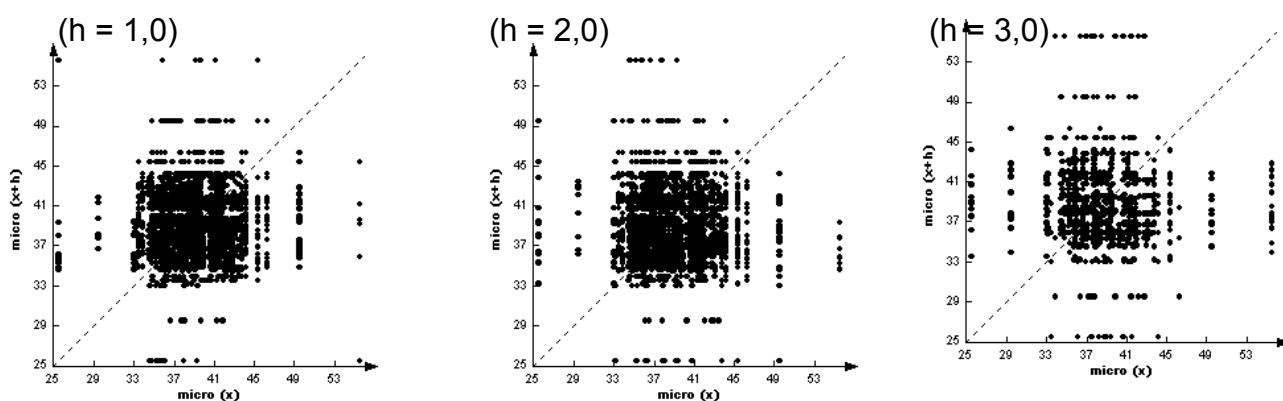


Figura 64 - Gráfico da média móvel *versus* desvio padrão para o atributo produtividade da soja

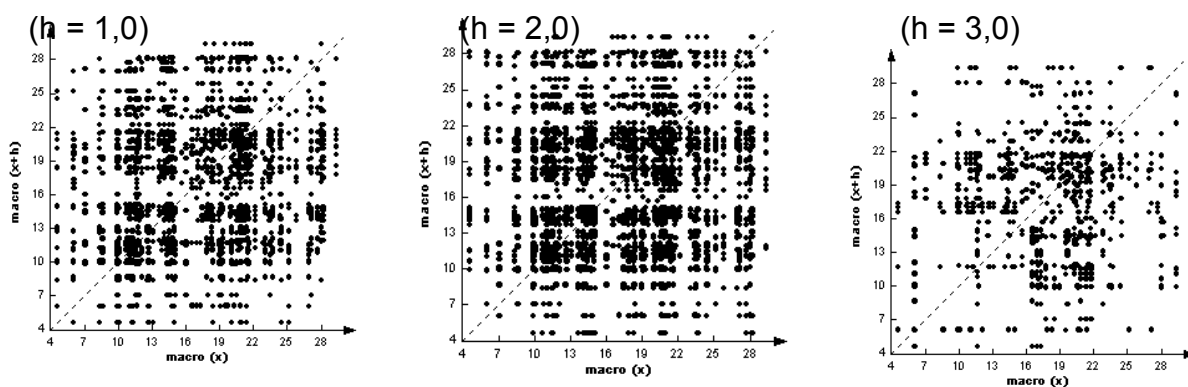
ANEXO P



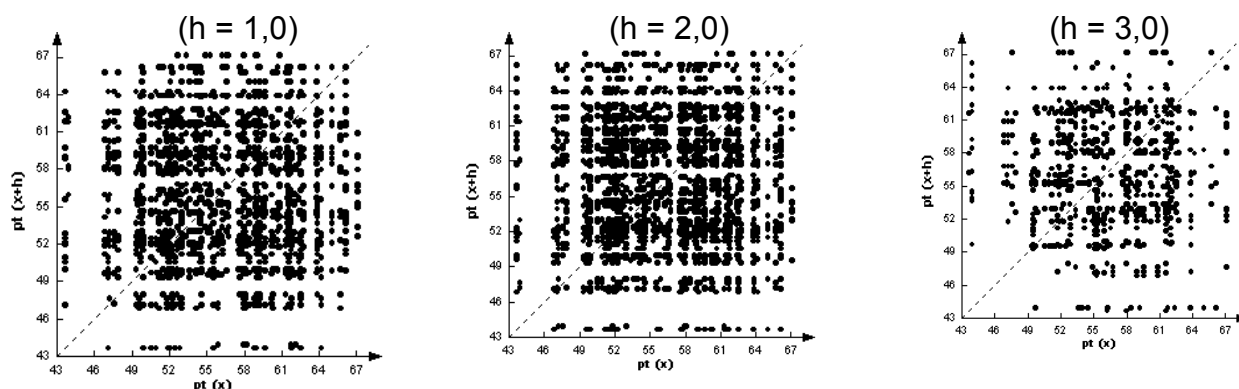
ANEXO 1P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a densidade do solo na profundidade 0 - 10 cm



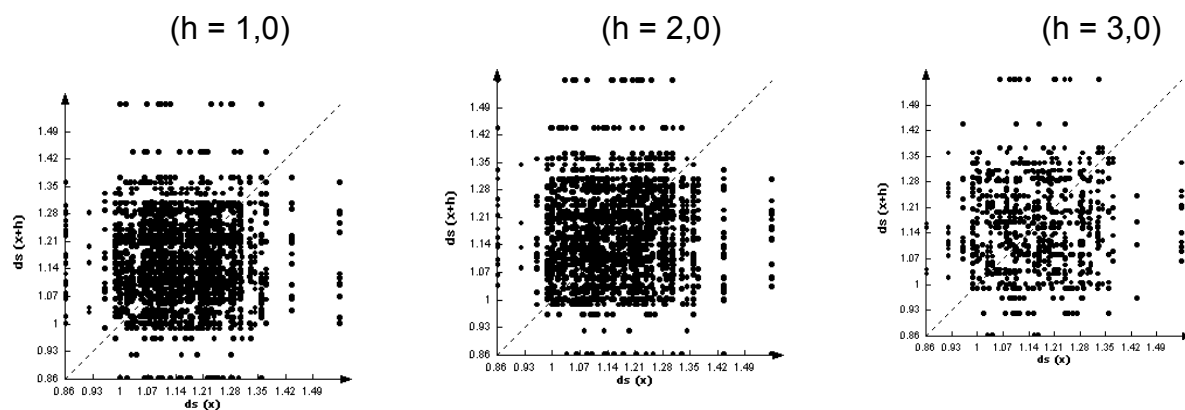
ANEXO 2P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a microporosidade do solo na profundidade 0 - 10 cm



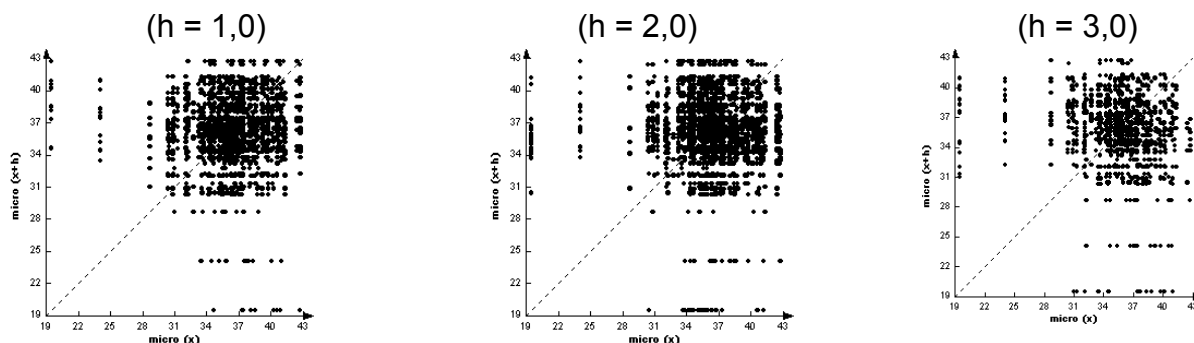
ANEXO 3P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a macroporosidade do solo na profundidade 0 - 10 cm



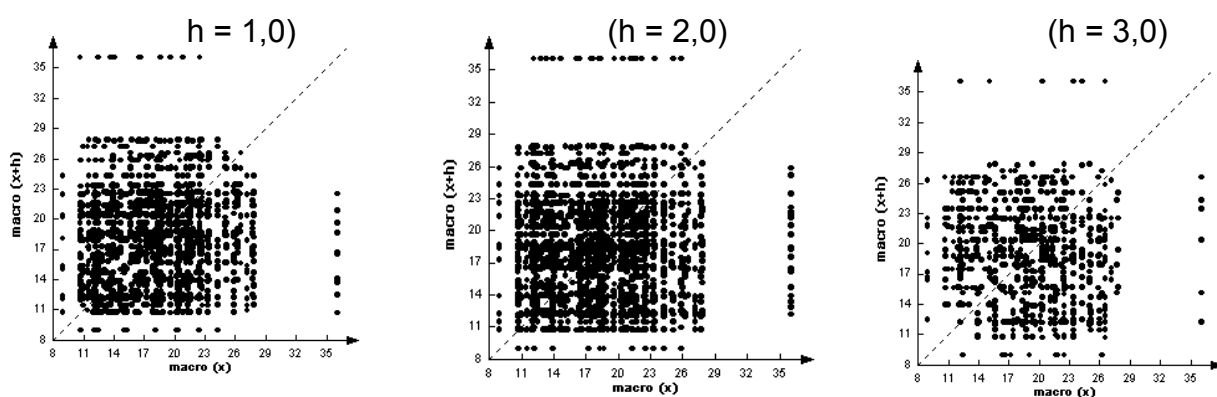
ANEXO 4P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a porosidade total do solo na profundidade 0 - 10 cm



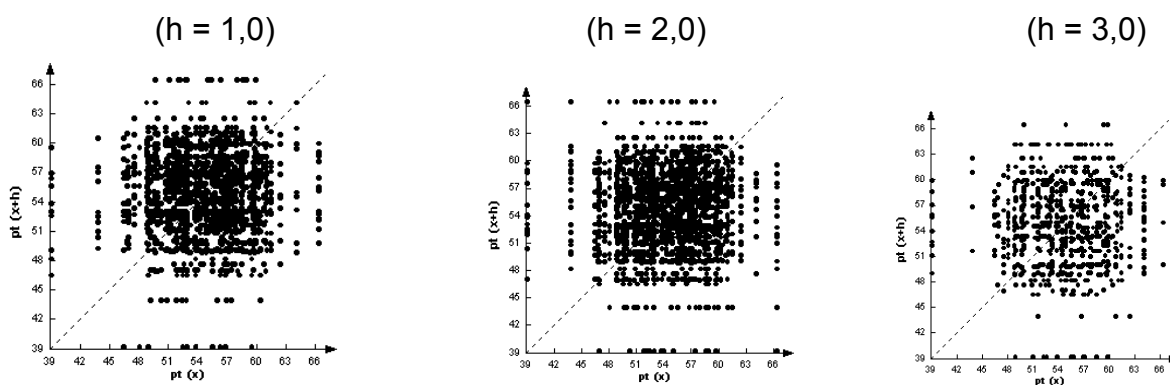
ANEXO 5P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a densidade do solo na profundidade 10 - 20 cm



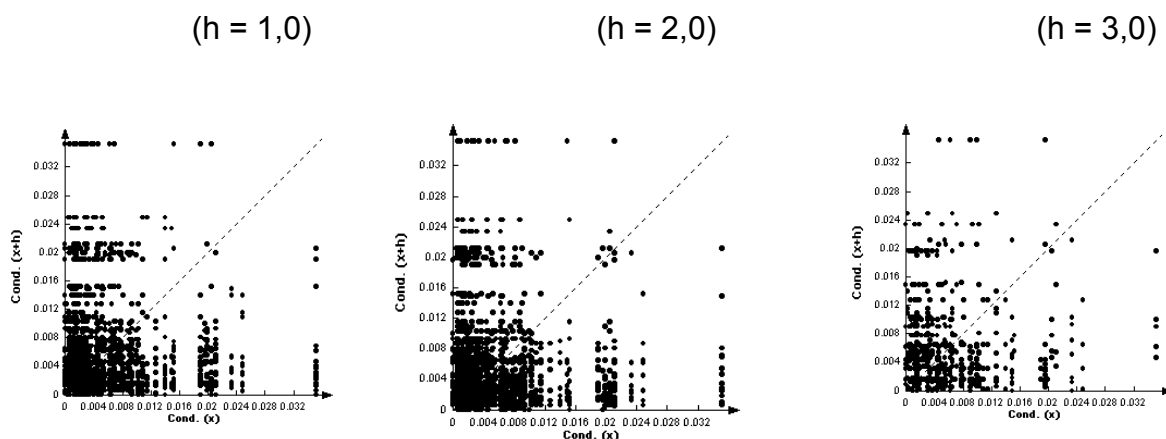
ANEXO 6P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a microporosidade do solo na profundidade 10 - 20 cm



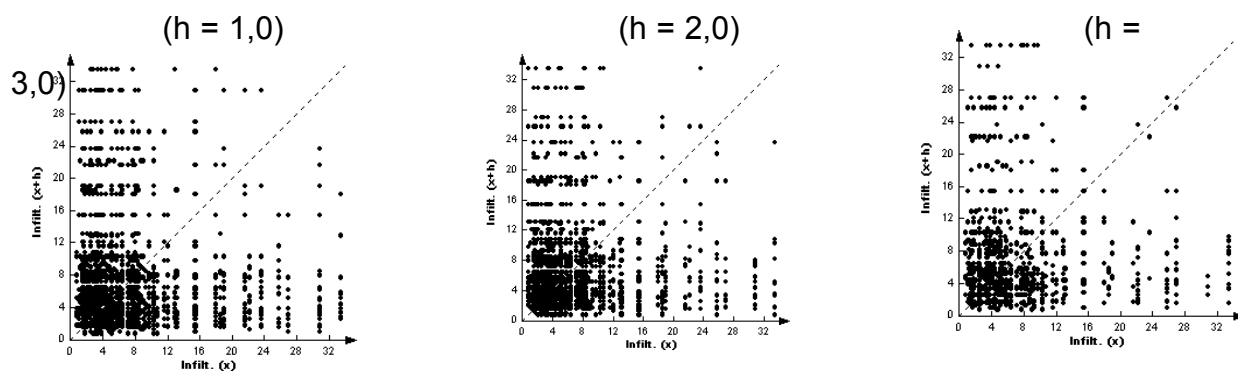
ANEXO 7P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a macroporosidade do solo na profundidade 10 - 20 cm



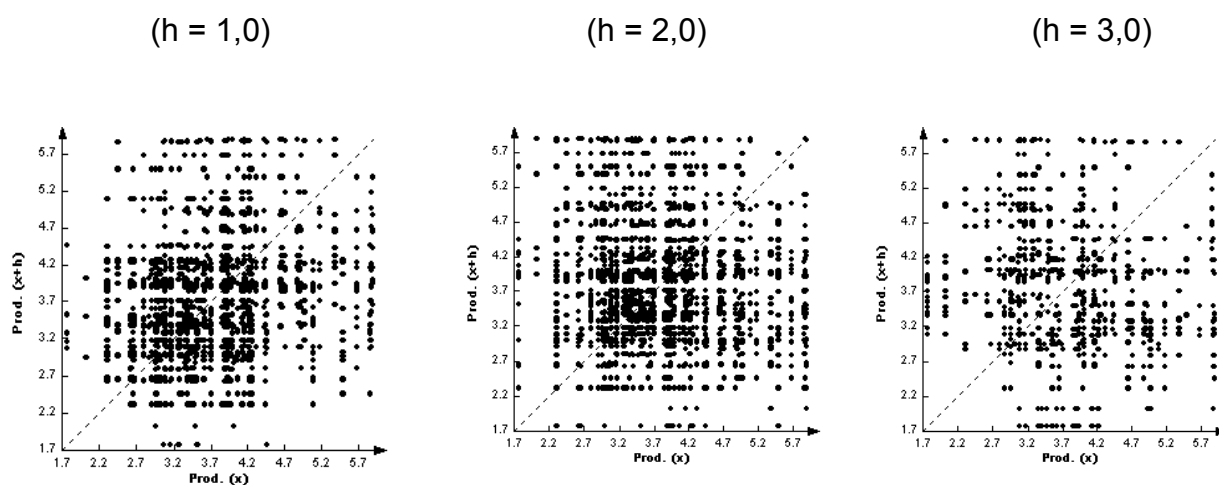
ANEXO 8P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a porosidade total do solo na profundidade 10 - 20 cm



ANEXO 9P - Gráfico *h-scatterplots* nas direções X e Y para a condutividade hidráulica



ANEXO 10P - Gráfico h -scatterplots nas direções X e Y para a infiltração da água no solo



ANEXO 11P - Gráfico h -scatterplots nas direções X e Y para a produtividade da soja

ANEXO Q

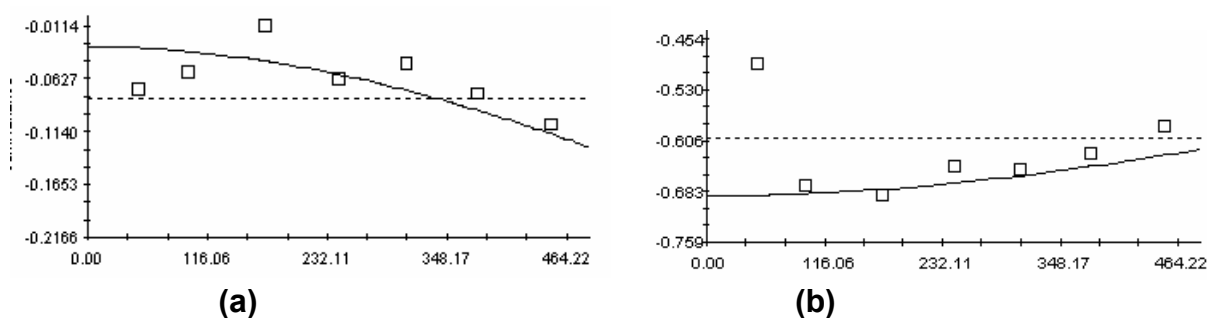


Figura 65 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e microporosidade(0 – 10 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a macroporosidade (0 – 10 cm) (b)

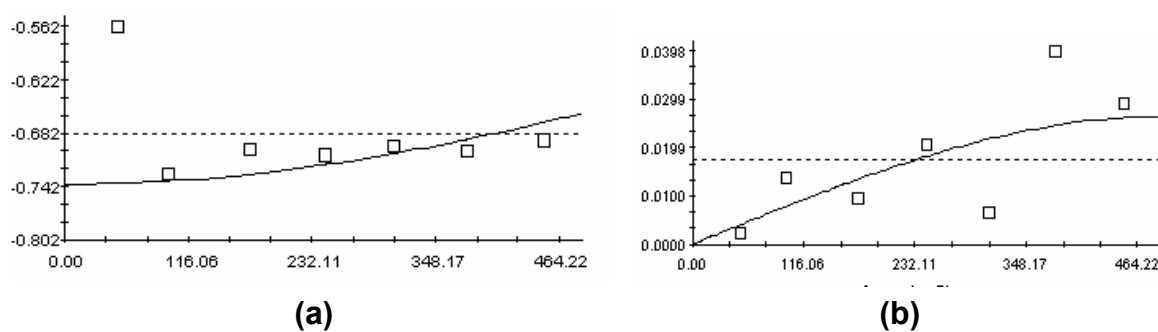


Figura 66 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e microporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 –20 cm) (b)

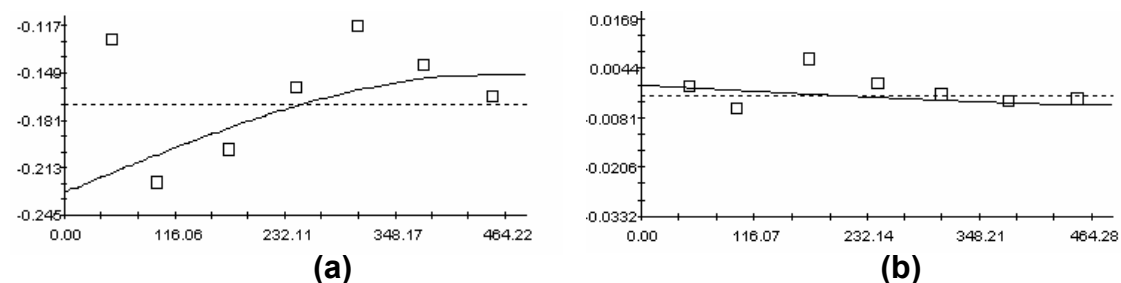
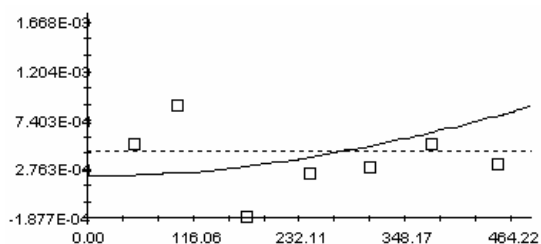
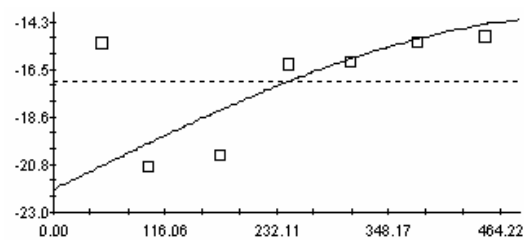


Figura 67 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e porosidade total (10 – 20 cm) (a) e para a densidade do solo (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica(b)

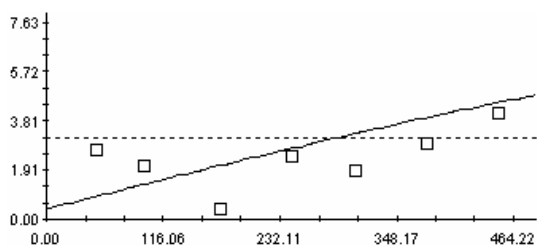


(a)

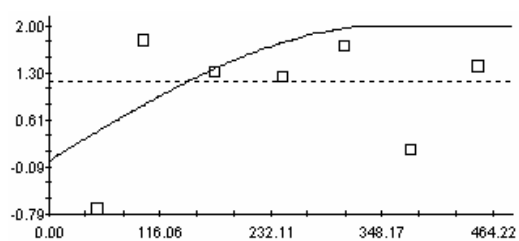


(b)

Figura 68 - Semivariograma cruzado para a densidade do solo (0 – 10 cm) e infiltração (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a macroporosidade (0 – 10 cm) (b)

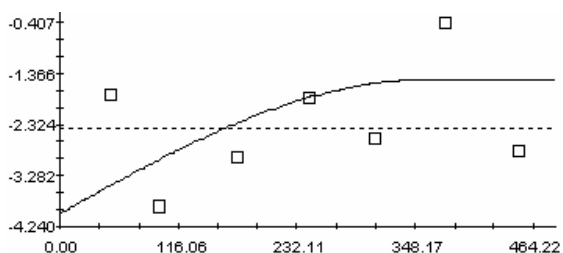


(a)

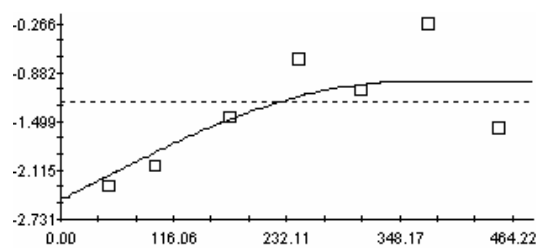


(b)

Figura 69 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e porosidade total (0 – 10 cm) (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 – 20 cm) (b)



(a)



(b)

Figura 70 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e macroporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (b)

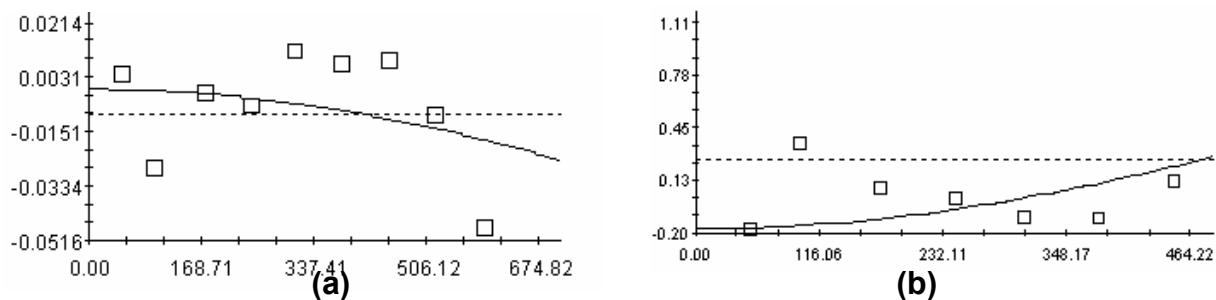


Figura 71 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (0 – 10 cm) e infiltração (a) e para a microporosidade (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (b)

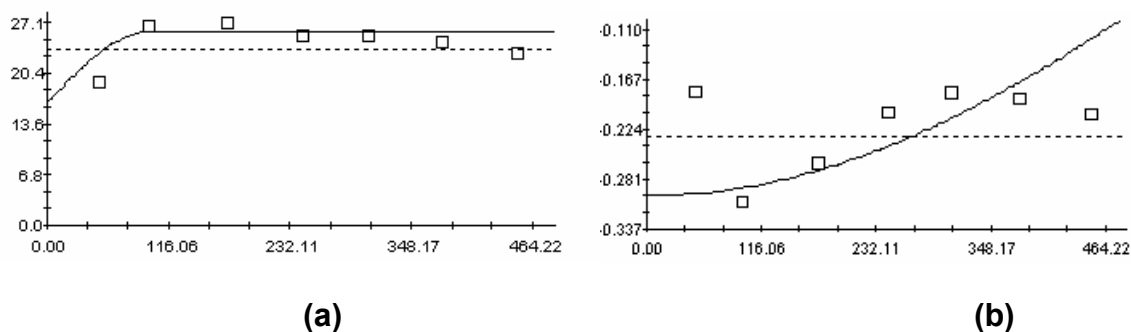


Figura 72 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (0 – 10 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a densidade (10 – 20 cm) (b)

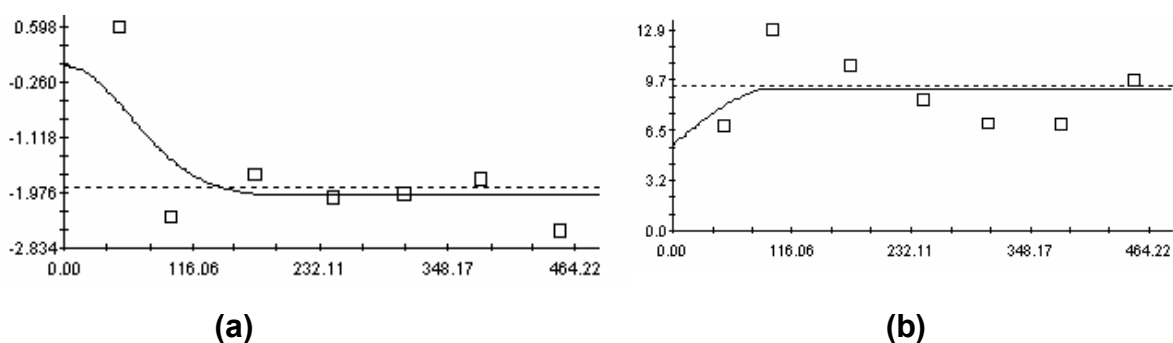
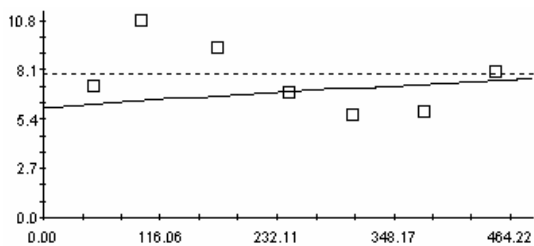
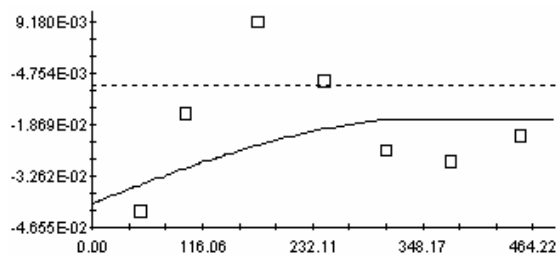


Figura 73 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (b)

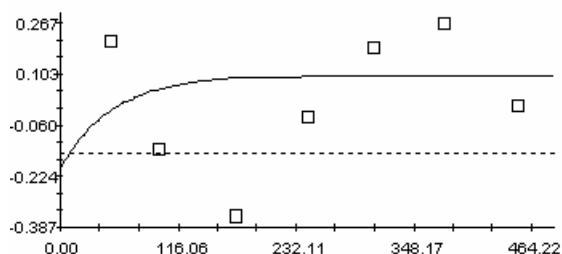


(a)

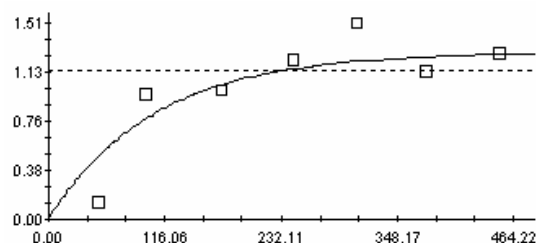


(b)

Figura 74 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a infiltração (b)

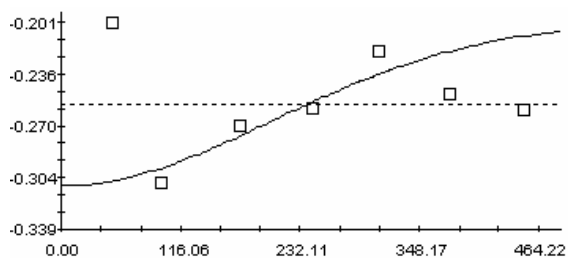


(a)

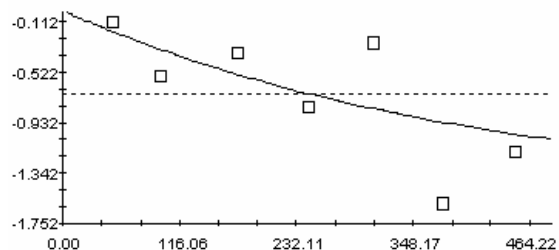


(b)

Figura 75 - Semivariograma cruzado para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (a) e para a macroporosidade (0 – 10 cm) e a produtividade (b)



(a)



(b)

Figura 76 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a densidade (10 – 20 cm) (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a microporosidade (10 – 20 cm) (b)

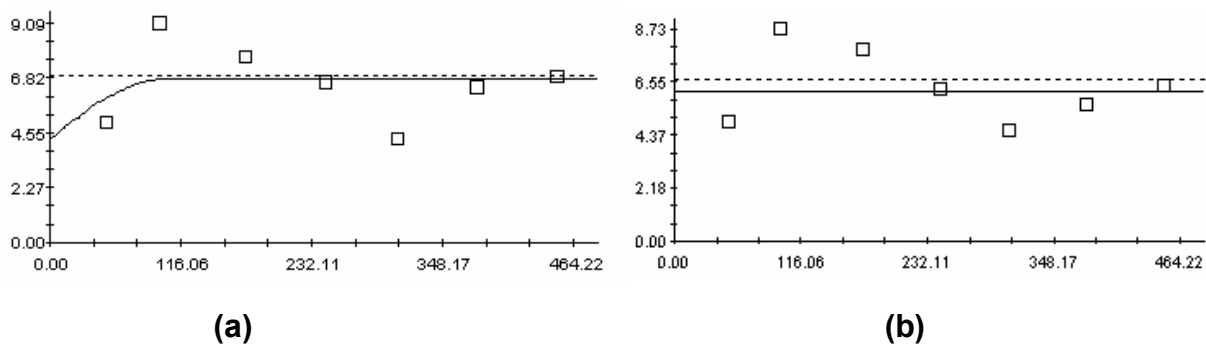


Figura 77 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (b)

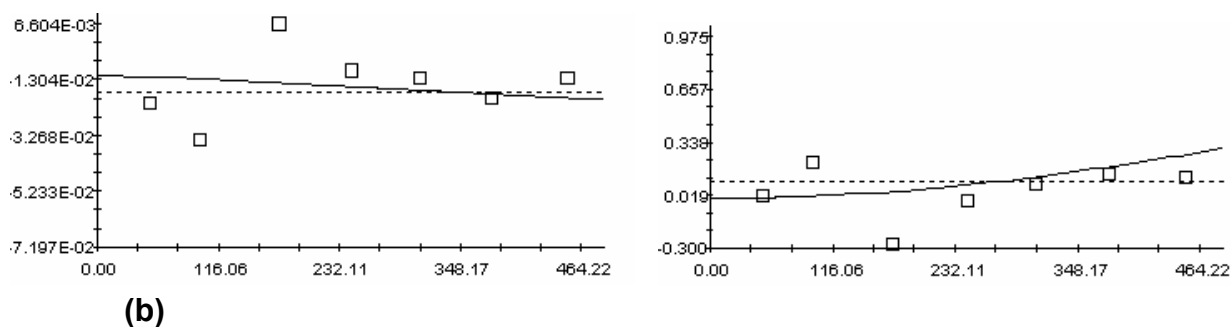


Figura 78 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (0 – 10 cm) e a infiltração (a) e para a porosidade total (0 – 10 cm) e a condutividade hidráulica (b)

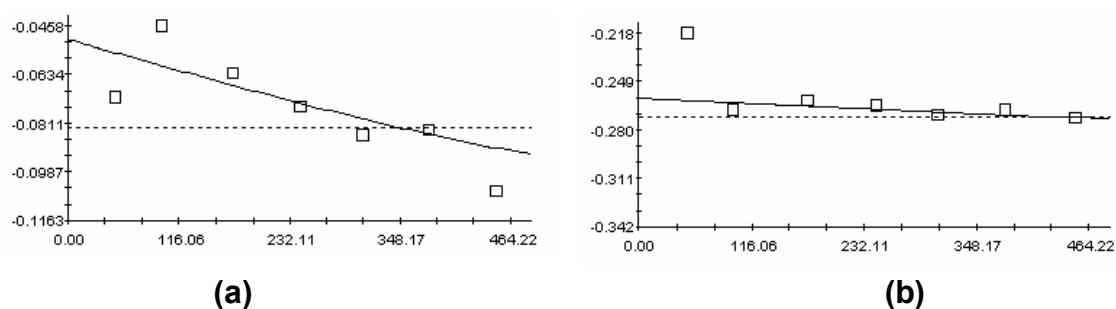


Figura 79 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 – 20 cm) e a microporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a densidade (10 – 20 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (b)

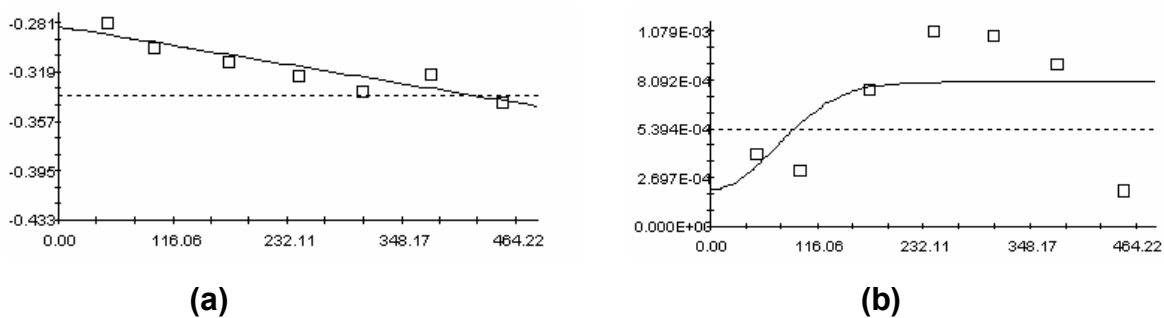


Figura 80 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 –20 cm) (a) e para a densidade (10 –20 cm) e a infiltração (10 –20 cm) (b)

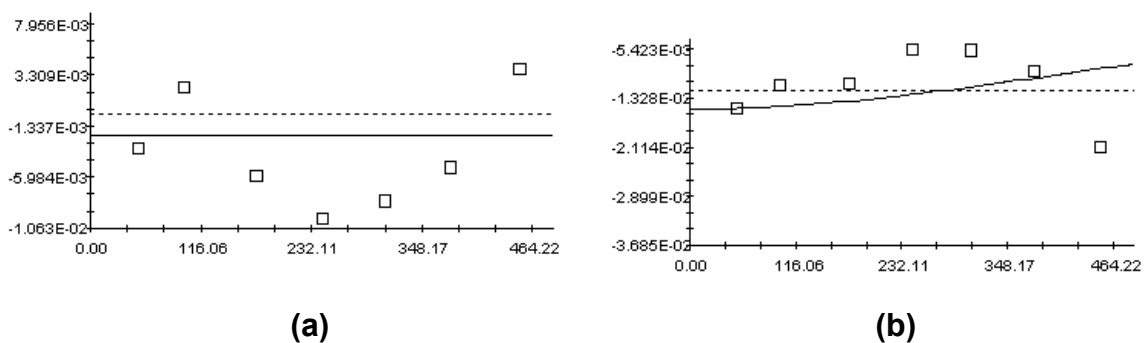


Figura 81 - Semivariograma cruzado para a densidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (a) e para a densidade (10 –20 cm) e a produtividade (b)

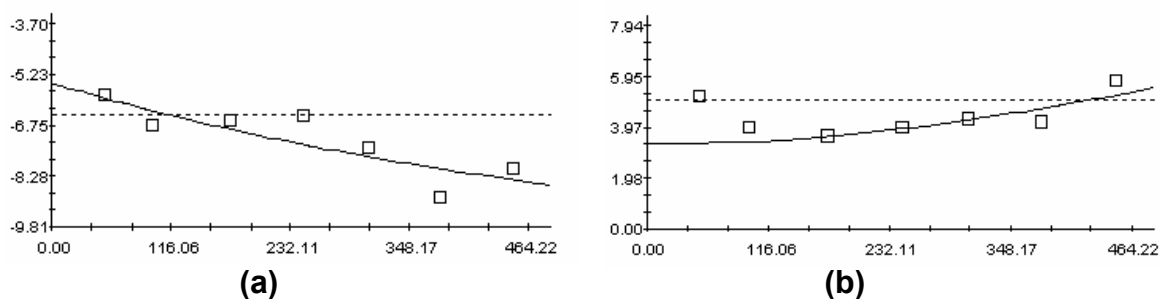
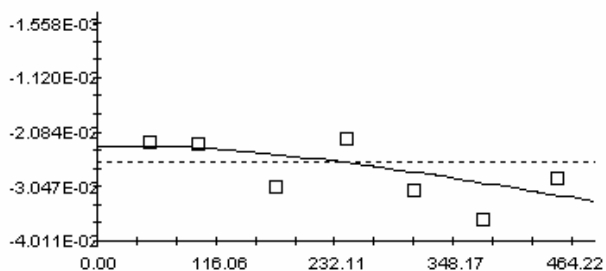
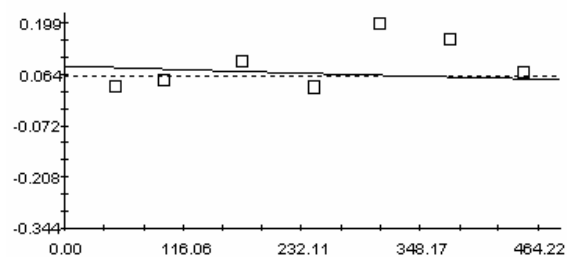


Figura 82 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a macroporosidade (10 – 20 cm) (a) e para a microporosidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 20 cm) (b)

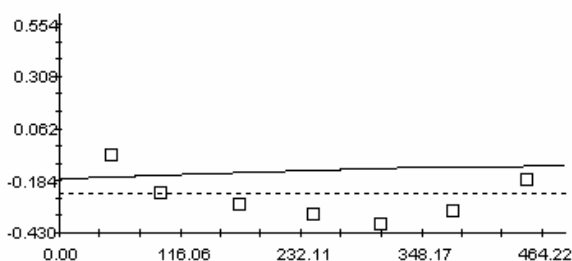


(a)

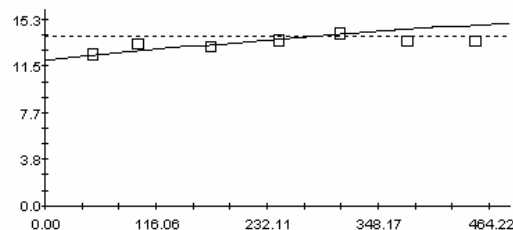


(b)

Figura 83 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a microporosidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b)

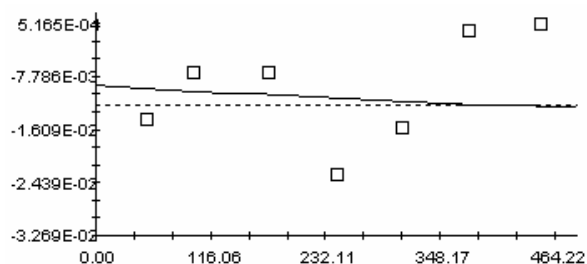


(a)

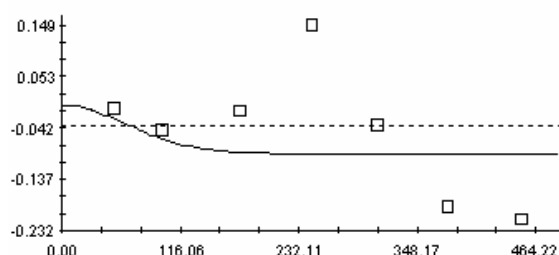


(b)

Figura 84 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a produtividade (a) e para a macroporosidade (10 –20 cm) e a porosidade total (10 – 20 cm) (b)

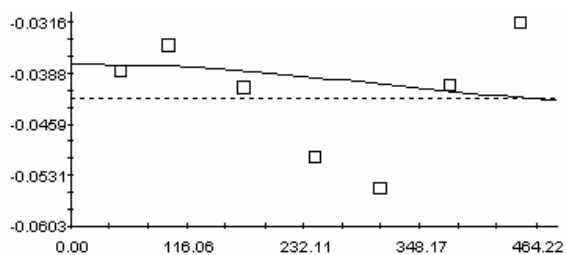


(a)

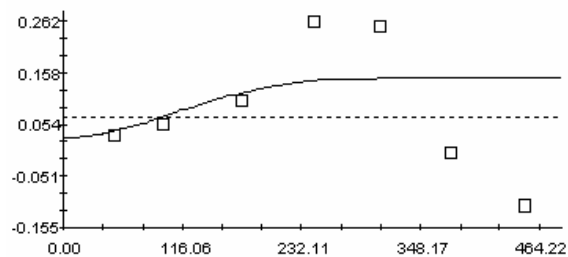


(b)

Figura 85 - Semivariograma cruzado para a microporosidade (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a macroporosidade (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b)

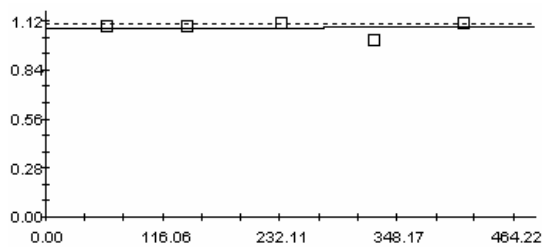


(a)

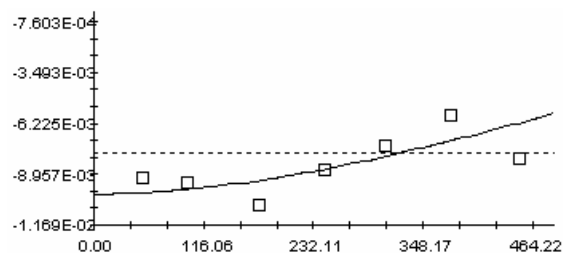


(b)

Figura 86 - Semivariograma cruzado para a porosidade total (10 –20 cm) e a infiltração (a) e para a porosidade total (10 –20 cm) e a condutividade hidráulica (b)



(a)



(b)

Figura 87 - Semivariograma cruzado para a infiltração e a condutividade (a) e para a infiltração e a produtividade (b)

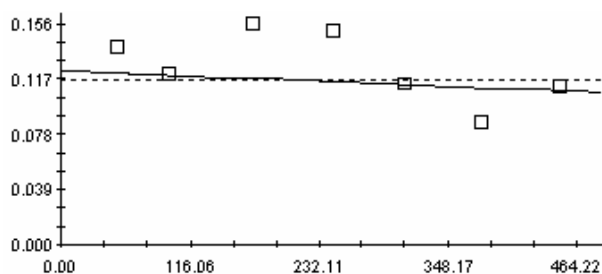


Figura 88 - Semivariograma cruzado para a condutividade e para a produtividade