

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**SÉRGIO RICARDO LIMA NEGRO**

**CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA  
SOJA COM ATRIBUTOS FÍSICOS DA RELAÇÃO MASSA VOLUME  
DO SOLO**

Ilha Solteira

2017

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA “SISTEMAS DE  
PRODUÇÃO**

**SÉRGIO RICARDO LIMA NEGRO**

Engenheiro Agrônomo

**CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA  
SOJA COM ATRIBUTOS FÍSICOS DA RELAÇÃO MASSA VOLUME  
DO SOLO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –  
UNESP - Câmpus de Ilha Solteira para a  
obtenção do título de DOUTOR EM  
AGRONOMIA, especialidade: Sistemas de  
Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Montanari

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732c Negro, Sérgio Ricardo Lima.  
Correlação linear e espacial da produtividade da soja com atributos físicos da relação massa volume do solo / Sérgio Ricardo Lima Negro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
90 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema de Produção, 2017

Orientador: Rafael Montanari  
Inclui bibliografia

1. Métodos de determinação da densidade do solo. 2. Porosidade do solo. 3. Geoestatística. 4. Plantio direto. 5. *Glycine max.*

  
João José Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Diretor Técnico

CRB 5642/8



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA COM ATRIBUTOS FÍSICOS DA RELAÇÃO MASSA VOLUME DO SOLO

AUTOR: SÉRGIO RICARDO LIMA NEGRO

ORIENTADOR: RAFAEL MONTANARI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA, especialidade: SISTEMAS DE PRODUÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ELCIO HIROYOSHI YANO  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RONALDO CINTRA LIMA  
Coordenação de Curso de Engenharia Agrônoma / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena

Prof. Dr. VÍTOR CORRÊA DE MATTOS BARRETTO  
Departamento de Agronomia / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena

Ilha Solteira, 18 de agosto de 2017

## DEDICATÓRIA

DEDICO

Aos meus maravilhosos pais, “Ranolfo Negro e Maria Eurides Lima Negro (*in memoriam*)”, que me ensinaram amorosamente o caminho do bem e tornaram possível a realização desta importante etapa da minha vida; à minha amada esposa, Lucia Helena Zanetti Lima Negro, que em todos os momentos, me compreendeu e incentivou, carinhosa e respeitosamente, depositando confiança e amor em mim. Amo vocês!

Agradeço  
a Deus,  
por não me deixar desistir.

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus vivo, que me permitiu realizar esta tese e sempre me fortaleceu diante das dificuldades.

À minha maravilhosa esposa, Lucia Helena Zanetti Lima Negro, pelo companheirismo, paciência, carinho e amor.

Aos meus queridos irmãos Luis Henrique Lima Negro e Ranolfo Negro Júnior e as minhas queridas cunhadas Marilda Silveira Lima Negro e Lia Márcia Brito Negro pelo apoio, encorajamento e dedicação em todos os momentos que necessitei.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Sistema de Produção, pelo acolhimento e pelas condições de aprendizado oferecido ao longo do curso.

Ao amigo e professor Dr. Rafael Montanari, pela orientação acadêmica dedicada.

Aos professores e funcionários do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos do Câmpus de Ilha Solteira e ao técnico Valdivino, por toda a ajuda, paciência e ensinamentos.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa.

Aos amigos da República, e em especial ao Flávio Carlos Dalchiavon, pela presteza em ajudar nas etapas desta pesquisa.

E a todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, participaram desta conquista.

*“A alegria está na luta, na tentativa,  
no sofrimento envolvido  
e não na vitória propriamente dita”.*  
*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é importante indicador de manejo localizado nas áreas agrosilvopastoris. No ano agrícola de 2009/10 em Selvíria (MS), analisaram-se os componentes de produção da soja e atributos físicos da relação massa/volume de um Latossolo Vermelho Distroférico em plantio direto, com objetivo de encontrar correlações lineares e espaciais entre eles. Foi instalada uma malha geoestatística para a coleta dos dados, totalizando 99 pontos amostrais numa área de 10 ha. Os atributos do solo, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram: a densidade do solo, DS (métodos do anel volumétrico e do torrão parafinado), densidade de partículas do solo, DP (métodos do balão volumétrico e do balão volumétrico modificado) e a porosidade total do solo, PT, utilizando os valores de DS e DP dos diferentes métodos de determinação, calculada pela fórmula  $PT = (1 - DS/DP)$ . Os componentes de produção da soja foram: número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG), massa de grãos por planta (MGP), população de plantas (POP), altura de plantas (ALT) e produtividade de grãos obtida (PGO). Alguns dos componentes de produção da soja e dos atributos físicos do solo revelaram dependência espacial, possibilitando mapear a área de produção. Assim, os alcances geoestatísticos recomendados para futuras pesquisas deverão estar entre 273 e 526,5 m. Espacialmente, foi possível estimar a PGO pela co-krigagem com a MGP; com a DS (método do anel volumétrico) de 0,00-0,10 m; com a PT, calculada pela relação entre a DS (método anel volumétrico)/DP (método do balão volumétrico) de 0,10-0,20 m; e com a PT, calculada pela DS (método do anel volumétrico)/DP (método do balão volumétrico modificado) de 0,00-0,10 m. A MGP pode ser estimada pela co-krigagem com a DS, quando determinada pelo método do anel volumétrico, na camada de 0,00-0,10 m. Portanto, foi possível estimar a variabilidade espacial da PGO e da MGP e mapear a área, a fim de propor estratégias de manejo visando aumentar a produtividade da soja.

**Palavras chave:** Métodos de determinação da densidade do solo. Porosidade do solo. Geoestatística. Plantio direto. *Glycine max*.

## ABSTRACT

The soil physical attributes spatial variability is an important indicator of localized management practices in the agrosilvopastoral areas. In the 2009/2010 agricultural year in Selvíria (MS), soybean yield components and physical attributes of the mass/volume ratio of a dystroferric Red Latosol (Typic Acrustox) under a no-tillage system were analyzed in order to find linear and spatial correlations between them. It was installed a geostatistical grid to collect the data, totalizing 99 sampling points in an area of 10 ha. The soil attributes in the 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m layers were: soil bulk density, BD (volumetric ring and paraffin sealed clod methods), soil particle density, PD (volumetric flask and modified volumetric flask methods) and total soil porosity, TP, calculated by the resulting ratio between BD and PD, using the formula  $TP = (1-BD/PD)$ . The components of soybean yield were: number of pods per plant, number of grains per pod, mass of 100 grains, grain mass per plant, plant population, plant height and soybean yield. Some of the determined soybean yield components and some of the physical soil attributes revealed spatial dependence, making it possible to map the yield area. Thus, the recommended geostatistical ranges for further researches thus shall be between 273 and 526.5 m. Spatially, it was possible to estimate the soybean yield by co-kriging it with the grain mass per plant; and with the soil bulk density (volumetric ring method) of 0.00-0.10 m; and with the total soil porosity, calculated by the ratio between soil bulk density (volumetric ring method)/soil particle density (volumetric flask method) of 0.10-0.20 m; and with the total soil porosity, calculated by the soil bulk density (volumetric ring method)/soil particle density (modified volumetric flask method) of 0.00-0.10 m. The grain mass per plant could be estimated by co-kriging it with the soil bulk density (volumetric ring method) of 0.00-0.10 m. Therefore, it was possible to estimate the spatial variability of soybean yield and of grain mass per plant in order to map the area to propose management strategies aiming to increase soybean yield.

**Keywords:** Soil bulk density assessment methods. Total soil porosity. Geostatistics. Notillage system. *Glycine max*.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Levantamento planimétrico da área experimental.....	26
<b>Figura 2.</b> Resistência mecânica à penetração (MPa) em função das camadas do solo.....	29
<b>Figura 3.</b> Equação de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e a massa de grãos por planta da soja num Latossolo Vermelho Distroférico.....	53
<b>Figura 4.</b> Equações de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e atributos (PT2, PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférico.....	55
<b>Figura 5.</b> Equações de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e massa de grãos por planta da soja e a densidade (DS1) de um Latossolo Vermelho Distroférico.....	55
<b>Figura 6.</b> Semivariogramas dos componentes de produção da cultura da soja (PGO, MGP) num Latossolo Vermelho Distroférico.....	60
<b>Figura 7.</b> Semivariogramas de atributos (DS1, DP3, PT1, PT2 e PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférico.....	61
<b>Figura 8.</b> Mapas de krigagem dos componentes de produção da cultura da soja (PGO, MGP) num Latossolo Vermelho Distroférico.....	62
<b>Figura 9.</b> Mapas de krigagem de atributos (DS1, DP3, PT1, PT2, PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférico.....	64
<b>Figura 10.</b> Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da massa de grãos por planta da soja de um Latossolo Vermelho Distroférico.....	68

- Figura 11.** Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da DS1 de um Latossolo Vermelho Distroférico.....68
- Figura 12.** Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da PT2 de um Latossolo Vermelho Distroférico.....70
- Figura 13.** Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da PT3 de um Latossolo Vermelho Distroférico.....71
- Figura 14.** Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da massa de grãos por planta da soja em função da DS1 de um Latossolo Vermelho Distroférico.....72

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado.....	28
<b>Quadro 2:</b> Análise inicial dos atributos físicos do solo estudado.....	29
<b>Quadro 3:</b> Análise inicial dos atributos químicos da fertilidade do solo.....	30
<b>Quadro 4:</b> Análise descritiva inicial dos componentes de produção da soja produzida num Latossolo Vermelho Distroférrico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS).....	40
<b>Quadro 5:</b> Análise descritiva inicial dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférrico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS).....	42
<b>Quadro 6:</b> Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja produzida num Latossolo Vermelho Distroférrico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS).....	48
<b>Quadro 7:</b> Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja e de um Latossolo Vermelho Distroférrico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS), na camada de 0,00-0,10 m.....	50
<b>Quadro 8:</b> Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja e de um Latossolo Vermelho Distroférrico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS), na camada de 0,10-0,20 m.....	51
<b>Quadro 9:</b> Parâmetros dos semivariogramas dos componentes de produção da soja em um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).....	58
<b>Quadro 10:</b> Parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS).....	59

<b>Quadro 11:</b> Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para alguns componentes de produção da soja e dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).....	67
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações gerais sobre a cultura da soja</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Origem e introdução no Brasil</i> .....	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<i>Histórico de produção</i> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Aspectos edafológicos gerais</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.1</b>	<i>O solo</i> .....	<b>17</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Atributos físicos da relação massa-volume do solo</i> .....	<b>19</b>
<b>2.2.2.1</b>	<i>Densidade do solo (DS)</i> .....	<b>19</b>
<b>2.2.2.2</b>	<i>Densidade de partículas do solo (DP)</i> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2.3</b>	<i>Porosidade total do solo (PT)</i> .....	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Atributos físicos interrelacionados com a produtividade da soja</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>A geoestatística na pesquisa agrônômica</b> .....	<b>213</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização do campo experimental</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Histórico da área</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Solo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Caracterização inicial do solo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Análises físicas do solo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Análises químicas do solo</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Implantação e condução da soja</b> .....	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Implantação e caracterização das malhas experimentais no campo</b> .....	<b>31</b>
<b>3.7</b>	<b>Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados</b> .....	<b>31</b>
<b>3.7.1</b>	<b>Determinação dos atributos físicos do solo</b> .....	<b>31</b>
<b>3.7.1.1</b>	<i>Densidade do solo pelo método do anel volumétrico</i> .....	<b>32</b>
<b>3.7.1.2</b>	<i>Densidade do solo pelo método do torrão parafinado</i> .....	<b>33</b>
<b>3.7.1.3</b>	<i>Densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico</i> .....	<b>33</b>
<b>3.7.1.4</b>	<i>Densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico modificado</i> .....	<b>34</b>
<b>3.7.1.5</b>	<i>Porosidade total do solo</i> .....	<b>36</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Determinação dos componentes de produção da soja</b> .....	<b>36</b>
<b>3.8</b>	<b>Análise estatística dos atributos pesquisados</b> .....	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>

<b>4.1</b>	<b>Análise descritiva dos dados.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.1</b>	<b><i>Variabilidade dos atributos estudados.....</i></b>	<b>40</b>
4.1.1.1	<i>Componentes de produção da soja .....</i>	40
4.1.1.2	<i>Atributos do solo .....</i>	41
<b>4.1.2</b>	<b><i>Distribuição de frequência dos atributos .....</i></b>	<b>43</b>
4.1.2.1	<i>Componentes de produção da soja .....</i>	43
4.1.2.2	<i>Atributos do solo .....</i>	43
<b>4.1.3</b>	<b><i>Valores médios dos atributos estudados.....</i></b>	<b>44</b>
4.1.3.1	<i>Componentes de produção da soja .....</i>	44
4.1.3.2	<i>Atributos do solo .....</i>	45
<b>4.2</b>	<b>Análise de regressão entre os atributos estudados.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Regressão linear simples.....</i></b>	<b>47</b>
4.2.1.1	<i>Matriz de correlação linear simples entre os atributos.....</i>	47
4.2.1.1.1	COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA VERSUS COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA .....	47
4.2.1.1.2	COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA VERSUS ATRIBUTOS DO SOLO .....	49
4.2.1.2	<i>Regressão linear simples entre os atributos estudados .....</i>	52
<b>4.3</b>	<b>Análise geoestatística .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.1</b>	<b><i>Análise semivariográfica simples .....</i></b>	<b>56</b>
4.3.1.1	<i>Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos estudados .....</i>	56
4.3.1.2	<i>Mapas de krigagem dos atributos estudados.....</i>	62
<b>4.3.2</b>	<b><i>Análise semivariográfica cruzada .....</i></b>	<b>64</b>
4.3.2.1	<i>Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem entre os atributos estudados.....</i>	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de biomassa num ecossistema agrícola depende, a princípio, dos fatores ambientais, que basicamente são a radiação solar, o CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, a água, os nutrientes e o clima, para que o processo de fotossíntese seja realizado. Entretanto, as características físicas do ecossistema e a interação dos fatores ecológicos (geologia, relevo, hidrografia, clima, solos e vegetação) determinam as potencialidades, fragilidades e limitações de cada ambiente em relação à produção de biomassa e devem ser levadas em consideração para que haja sustentabilidade. Quanto mais um ecossistema agrícola se afasta do natural em seus componentes, mais dependente das ações do homem ele se torna para produzir sustentavelmente. Somente a partir dessa compreensão podem ser feitas propostas e recomendações técnicas, de modo a unir a produção à conservação ambiental, resultando num desenvolvimento rural efetivo (WISNIEWSKI, 2006).

Para atuar sobre o mundo real e desse extrair seu sustento, foi necessário que o homem se aperfeiçoasse em tecnologias e conhecimentos. O tratamento das informações de um determinado espaço é hoje um requisito necessário para ordenar e controlar a ocupação de unidades físicas do meio ambiente para evitar decisões que contrapõem a lógica racional de sua utilização. Para acompanhar a complexidade do uso do solo é preciso dispor de técnicas que proveem referências espaciais da ordenação dessa ocupação, passíveis de tratamentos automatizados. Dentre essas, destacam-se os sistemas de informações geográficas (SIGs), que podem ser definidos como sistemas destinados ao tratamento automatizado de dados georreferenciados, passíveis de serem utilizados no diagnóstico do manejo e fertilidade do solo para melhorar a acurácia das recomendações técnicas que serão destinadas à discussão com o produtor rural (SIRTOLI et al., 2006).

Devido à grande importância da soja na economia brasileira, as buscas por práticas que aumentem sua produtividade são cada vez mais recorrentes. Entende-se que a qualidade do solo é fortemente influenciada pelos seus atributos físicos, químicos e biológicos, o que tem aumentado a demanda por pesquisas que visam definir sobre as relações desses atributos com os componentes produtivos da cultura para a tomada de decisões quanto às práticas de manejo a serem realizadas.

Do ponto de vista físico do solo, por exemplo, com o despertar de uma agricultura intensiva, na qual o número de máquinas que trafegam em uma área é grande e o cultivo é feito mais com base num planejamento temporal em detrimento à conservação dos recursos edáficos, destaca-se o problema da compactação do solo que vem aparecendo

sistematicamente em extensas regiões do país. Assim, há impacto nos atributos físicos do solo, tais como a densidade, a resistência à penetração, a porosidade total, o tamanho e continuidade dos poros, afetando as propriedades deles dependentes, tais como aeração, crescimento radicular, infiltração, retenção e capacidade de armazenamento de água, podendo ou não, comprometer a produtividade agrícola (FAVARETTO et al., 2006).

Com base no exposto, desenvolveu-se a presente pesquisa que teve como objetivos: a) analisar a variabilidade dos componentes de produção da soja e a dos atributos físicos da relação massa/volume de um Latossolo Vermelho Distroférico argiloso, determinados por métodos diversos em duas profundidades; b) definir as correlações lineares e espaciais entre os componentes e os atributos do solo; c) analisar a dependência espacial entre eles, com vistas ao mapeamento da área de produção para fins de agricultura de precisão e d) pesquisar, entre os atributos físicos do solo, os que satisfatoriamente explicariam a variabilidade dos componentes de produção da soja de sequeiro, em sistema de plantio direto no cerrado de Selvíria (MS).

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Considerações gerais sobre a cultura da soja**

#### ***2.1.1 Origem e introdução no Brasil***

A soja [*Glycine max* (L) Merrill] cultivada atualmente é muito diferente dos seus ancestrais, que eram plantas rasteiras que se desenvolviam na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do Rio Yangtse, na China. Sua evolução começou com o aparecimento de plantas oriundas de cruzamentos naturais entre duas espécies de soja selvagem que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Sua importância na dieta alimentar da antiga civilização chinesa era tal, que a soja, juntamente com o trigo, arroz e centeio, era considerada um grão sagrado, com direito a cerimoniais ritualísticos na época de semeadura e da colheita (EMBRAPA, 2017).

Apesar de conhecida e explorada no Oriente há mais de cinco mil anos e uma das mais antigas plantas cultivadas do Planeta, o Ocidente ignorou o seu cultivo até a segunda década do século vinte, quando os Estados Unidos (EUA) iniciaram a exploração comercial, primeiro como forrageira e, posteriormente, como grãos. A cultura da soja foi introduzida no Brasil via Estados Unidos, em 1882. Gustavo Dutra, professor da Escola de Agronomia da Bahia, realizou os primeiros estudos de avaliação de cultivares introduzidas daquele país. Em 1900 e 1901, o Instituto Agrônomo de Campinas, SP, promoveu a primeira distribuição de sementes de soja para produtores paulistas e para essa mesma data têm-se registros do primeiro plantio de soja no Rio Grande do Sul (RS). Nesse estado, a cultura encontrou efetivas condições climáticas para se desenvolver e expandir, dadas as semelhanças climáticas do ecossistema de origem dos materiais genéticos (EUA).

Com o estabelecimento do programa oficial de incentivo à triticultura nacional em meados dos anos 50, a cultura da soja foi igualmente incentivada, por ser, tanto do ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo gramínea), quanto econômico (melhor aproveitamento das máquinas, implementos, infraestrutura e mão de obra), a melhor alternativa de verão para suceder o trigo plantado no inverno (EMBRAPA, 2017).

#### ***2.1.2 Histórico de produção***

O primeiro registro de cultivo de soja no Brasil data de 1914, no município de Santa Rosa, RS. Porém, somente a partir dos anos 40 que esta leguminosa adquiriu importância

econômica, merecendo o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola do RS (área cultivada de 640 ha, produção de 450 t e produtividade de 700 kg ha<sup>-1</sup>).

Apesar do significativo crescimento da produção no decorrer dos anos 60, foi na década seguinte que a soja se consolidou como a principal cultura do agronegócio brasileiro, passando de 1,5 milhões de toneladas (1970) para mais de 15 milhões de toneladas (1979), crescimento que ocorreu não apenas por causa do aumento da área plantada (1,3 para 8,8 milhões de hectares), mas, também, devido ao expressivo incremento da produtividade (1140 para 1730 kg ha<sup>-1</sup>).

Nas décadas de 1980 e 1990 repetiu-se, na região tropical do Brasil, o explosivo crescimento da produção ocorrido nas duas décadas anteriores na Região Sul. Em 1970, menos de 2% da produção nacional de soja era colhido no Centro-Oeste, em 1980 esse percentual passou para 20%, em 1990 já era superior a 40% e em 2002 estava em 58%, tornando o Estado do Mato Grosso líder nacional de produção e produtividade de soja (EMBRAPA, 2017). Atualmente é a mais importante oleaginosa cultivada no mundo. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás dos EUA. Na safra 2016/17, a cultura ocupou uma área de 33,89 milhões de hectares, totalizando produção de 113,923 milhões de toneladas, com a expressiva produtividade média de 3273 kg ha<sup>-1</sup>. Os Estados brasileiros com maiores produções em 2017, em milhões de toneladas, foram Mato Grosso, com 30,51; Paraná, 19,53; e Rio Grande do Sul, 18,7 (CONAB, 2017).

## **2.2 Aspectos edafológicos gerais**

### **2.2.1 O solo**

Há tempos, o homem entendeu o solo como um elemento fundamental para sua sobrevivência. Os solos e os seus estudos tiveram sua importância reconhecida, quando o homem parou de buscar seu alimento na natureza apenas através da coleta, da caça e da pesca e passou a usar o solo para produzi-lo, deixando de ser nômade (GIASSON, 2006).

O solo é um dos componentes do ecossistema e serve como meio natural para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Pode ser definido como: “matéria mineral não consolidada na superfície da terra, que foi sujeita e influenciada por fatores genéticos e ambientais do material de origem, clima (incluindo efeitos da umidade e temperatura), macro, micro-organismos e topografia, todos atuando durante um período e produzindo um produto-solo, que difere do material de origem em muitas propriedades e características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas e morfológicas” (CURI et al., 1993).

Se hipoteticamente considerarmos o solo como uma casa, as partículas sólidas são os tijolos com os quais a casa é construída e a textura do solo descreve o tamanho das partículas. Na construção da casa, o modo como os tijolos são dispostos determina a natureza das paredes, quartos e corredores. A matéria orgânica e outras substâncias atuam como agente cimentante entre as partículas, formando os agregados do solo. Logo, a estrutura do solo descreve a maneira como as partículas são agregadas, definindo, portanto, a configuração do sistema poroso do solo (BRADY, 1990).

A formação do solo resulta da interação de fatores e processos de formação que variam no decorrer do tempo, da litologia, da topografia, do clima, da atividade biológica e da idade da área a ser estudada, o que o torna heterogêneo, resultando em um sistema dinâmico (TRANGMAR et al., 1985). Por conseguinte, o aumento da heterogeneidade do solo, em sistemas conservacionistas de manejo, criam um ambiente diferente daquele encontrado no sistema convencional, resultante dos efeitos dos resíduos superficiais e da reduzida movimentação. Dessa forma, o mapeamento dos seus atributos físicos, numa área agrícola, é de fundamental importância, tanto para a recomendação de práticas de manejo, como para a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental.

Silva e Nogueira Júnior (2001), dividem os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade das culturas em duas categorias. A primeira relaciona aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento das plantas; a água, o oxigênio, a resistência à penetração das raízes e a temperatura, que afetam diferentes processos fisiológicos tais como a fotossíntese, crescimento radicular e foliar, enquanto que a segunda relaciona os indiretamente, tais como a textura, agregação, porosidade e a densidade do solo, que afetam a produtividade das culturas devido à influência sobre a retenção de água, aeração, temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes.

A vegetação natural dos cerrados brasileiros tem sido sendo substituída por culturas anuais, pastagens e reflorestamentos. Os solos sob este ecossistema nativo normalmente apresentam, do ponto de vista agrícola, satisfatórios atributos físicos. Entretanto, a partir do momento em que são intensamente utilizados à produção agrícola, ocorrem alterações dos referidos atributos. De modo geral, verificam-se aumentos da densidade do solo, da resistência mecânica à penetração e da microporosidade e diminuições da porosidade total e da macroporosidade (TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; IMHOFF et al., 2001, ARAÚJO et al., 2003). Nesse sentido, Meurer (2007) afirma que quanto maior a densidade do solo, para solos de mesma classe textural, mais compacto é o solo, menos definida é a sua estrutura e muito menor o volume do espaço poroso, com prejuízo à taxa de difusão do O<sub>2</sub> nos

poros do solo e à respiração das raízes. Em geral, concentrações de O<sub>2</sub> na atmosfera do solo menor do que 10% afetam severamente o crescimento das raízes.

## **2.2.2 Atributos físicos da relação massa-volume do solo**

### **2.2.2.1 Densidade do solo (DS)**

A DS, densidade aparente, densidade global ou massa específica aparente é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca (105 a 110°C), e o volume total do solo, oriundo da soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros, preenchidos pela água e/ou pelo ar. Logo, qualquer fator que influencie o espaço poroso afetará a densidade do solo (KIEHL, 1979; BRADY, 1990, CAMARGO; ALLEONI, 1997; MACHADO; FAVARETTO, 2006).

A DS é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, muito utilizada como indicadora do grau de compactação (REICHARDT, 1985). Dessa forma, alterações nos valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação inversa que existe entre a DS e a porosidade total (DORAN et al., 1994). Ao se compactar uma amostra de solo, a massa permanece constante e o volume total diminui, por conseguinte a DS aumenta. Geralmente, aumentos no valor da DS, implicam em diminuição na qualidade para o crescimento radicular, redução da aeração e mudanças no comportamento da água no solo, como redução da infiltração (BRADY, 1990). Contudo, Beutler et al. (2007) afirmam que pequenos níveis de compactação do solo, que geralmente ocorrem no sistema plantio direto, podem aumentar a produtividade das culturas. Outra aplicação da DS é a de inferir sobre o impedimento mecânico ao sistema radicular das plantas (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

O aumento da DS nas primeiras camadas tem sido definido como compactação do solo, que ocorre quando a pressão exercida sobre o solo excede sua capacidade de suportar carga adicional e esta pressão é dissipada pelo fluxo de massa da zona que recebe a compressão, empurrando as partículas de solo para dentro do seu espaço poroso, gerando um rearranjo das mesmas, cujo resultado é a redução do espaço poroso, especialmente dos poros maiores, interferindo, assim, nos fluxos de ar, nutrientes, calor e água (BOWEN, 1981).

Na literatura existem informações sobre as oscilações dos valores de DS, levando-se em conta, basicamente, a textura do solo, o teor de matéria orgânica e a metodologia de obtenção. De acordo com Meurer (2007) a DS, nas condições naturais, situa-se desde 0,2 a 0,5 kg dm<sup>-3</sup> (solos turfosos) até 1,6 kg dm<sup>-3</sup> (solos arenosos). Giasson, (2006) cita um valor médio de 0,9 kg dm<sup>-3</sup> para solos com maiores teores de matéria orgânica, enquanto que nos

arenosos podem ocorrer valores superiores a  $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$ . Reichardt (1985) menciona valores entre  $1,4$  a  $1,8 \text{ kg dm}^{-3}$  para solos arenosos e de  $0,9$  a  $1,6 \text{ kg dm}^{-3}$  para os argilosos.

A DS pode ser obtida por meio de métodos não destrutivos, como pelo da radiação gama, ou métodos destrutivos com amostra indeformada tais como o método do anel volumétrico e o método do torrão parafinado (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Portanto, a determinação é possível por qualquer processo que permita obter a massa de material sólido contida num volume (REICHARDT, 1985).

O método do anel volumétrico é considerado como o método padrão de amostragem para avaliação da porosidade total e da DS. Esse método é criticado por provocar uma possível compactação do solo pelo atrito cilindro-solo durante a penetração deste no solo, principalmente quando o solo estiver com umidade acima do ponto de friabilidade, ou de fraturar ou cisalhar o solo quando o mesmo estiver seco (BLAKE; HARTGE, 1986).

O método do torrão apresenta a desvantagem de poder segregar a amostra pela ocasião da coleta dos torrões em solos que foram mobilizados e não completamente reconsolidados, desconsiderando os macroporos existentes entre os torrões. Os valores de DS determinados por este método são geralmente maiores que os valores determinados por outros métodos (BLAKE; HARTGE, 1986; VANREMORTEL; SHIELDS, 1993). Para solos mobilizados, o método do anel volumétrico seria o indicado por apresentar resultados mais confiáveis. Porém, ainda há necessidade de maior investigação das diferenças e do comportamento desses dois métodos, principalmente, para diferentes classes de solos e manejo.

#### *2.2.2.2 Densidade de partículas do solo (DP)*

A DP é basicamente o mesmo que massa específica das partículas e depende da composição da fração sólida do solo (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Assim, por não ser afetada pelo espaço poroso do solo, conseqüentemente não está relacionada com a sua estrutura (BRADY, 1990).

Conforme o autor supracitado, na maioria dos solos minerais, a DP varia de  $2,60$  a  $2,75 \text{ kg dm}^{-3}$ , devido à predominância de minerais como quartzo, feldspato, mica e colóides silicatados que possuem densidades dentro desta faixa. Para cálculos em geral, considerando a camada arável (1 a 5% de matéria orgânica), caso a DP não seja conhecida, atribui-se um valor médio de  $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ . Contudo, deverá ser corrigida para certas classes de solos, como, por exemplo, os constituídos de minerais predominantemente densos (magnetita, zircônio,

turmalina e hornblenda) que podem apresentar valores superiores a  $3,0 \text{ kg dm}^{-3}$ . Por outro lado, solos com alto teor de matéria orgânica (15 a 20%) podem apresentar valores inferiores a  $2,4 \text{ kg dm}^{-3}$  e solos orgânicos entre 1,1 e  $2,0 \text{ kg dm}^{-3}$ .

O método do balão volumétrico (MBV), descrito por KIEHL (1979) é um dos métodos mais frequentemente empregados para a determinação da DP. No entanto, mesmo apresentando maior rapidez, um laboratorista precisaria de um tempo de aproximadamente sete horas para o processamento de um equivalente de cem amostras. A maior parte do tempo é gasto para o enchimento da bureta e descarga gradual do álcool no balão contendo o solo. O volume de álcool gasto para completar o volume de um balão contendo sólidos pode ser determinado indiretamente, desde que se conheça a massa e a densidade do álcool, o que dispensaria as etapas mais demoradas supracitadas do MBV. Essa estratégia é recomendada para a análise da densidade específica ou de partículas de rochas e cascalhos, utilizando água destilada e auxílio de câmara de vácuo para retirada de ar da amostra (FLINT; FLINT, 2002).

#### *2.2.2.3 Porosidade total do solo (PT)*

A porosidade total é uma medida do espaço poroso do solo, o que a torna diretamente ligada à definição de densidade do solo e, portanto, sofre influência do nível de compactação, ou seja, quanto maior a densidade do solo menor a sua porosidade total (REICHARDT, 1985).

A porosidade total dos solos é afetada, principalmente, pela forma e arranjo das partículas do solo, ou seja, sua capacidade de formação de agregados. Solos arenosos, devido a pouca agregação, apresentam valores de porosidade oscilando, em média, entre 35 a 50% e os argilosos, pela agregação, entre 40 a 60% (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

### **2.3 Atributos físicos inter-relacionados com a produtividade da soja**

O adequado crescimento e desenvolvimento das plantas as levam a produzir grãos, fibras e outros produtos comerciáveis e dependem da harmonia de uma série de fatores ambientais (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Mais de uma centena de atributos de solo, planta, sistemas de manejo e do clima afetam, direta ou indiretamente, o crescimento dos vegetais (MEURER, 2007).

Os fatores de natureza física podem, tanto estimular quanto inibir o crescimento das plantas. As raízes podem crescer mais rapidamente em solos friáveis, entretanto a absorção de água e nutrientes pode ser limitada por um inadequado contato entre as raízes e o solo. O contato pode ser mais íntimo em um solo compactado, porém, o crescimento das raízes pode ser fortemente inibido pela elevada DS e resistência à penetração do solo, limitando o acesso das raízes à água e aos nutrientes, porque um desses fatores pode se tornar restritivo ao desenvolvimento das plantas, dependendo da condição climática, da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Muitos estudos relativos à compactação do solo, que utilizam a densidade como atributo indicador, evidenciam que o seu aumento ocasiona, no geral, diminuição da produtividade agrícola (ABREU et al., 2003; FARACO et al., 2008; REICHERT et al., 2009).

As principais alterações na DS estão geralmente associadas com as operações de preparo do solo para o cultivo, notadamente no “Sistema Plantio Convencional”. São decorrentes do tráfego de máquinas sobre o terreno nas operações de aração, gradagem, distribuição de corretivos, de fertilizantes, de defensivos, de colheita ou em áreas onde o pisoteio de animais é intenso (MEURER, 2007). O processo de compactação resulta da ação de forças mecânicas, podendo ser intensificado pelo uso excessivo de equipamentos pesados em condições de umidade inadequadas (SILVA et al., 1986). Além de modificar a porosidade e a densidade do solo, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, dentre outros efeitos (SILVA et al., 1994). Dessa forma, mudanças na DS servem como indicação de mudanças nas propriedades físicas que regulam o crescimento das raízes. Na camada compactada, as raízes sofrem uma série de modificações, tanto de ordem fisiológica, quanto morfológica, que afeta o seu desempenho e, por conseguinte, o da planta (ALVARENGA et al., 1996).

Na literatura há trabalhos (BEUTLER; CENTURION, 2004; BEUTLER, et. al., 2007) que corroboram o efeito proporcional do tráfego de máquinas nos níveis de compactação do solo, com diminuição na macroporosidade e aumento da densidade e resistência a penetração do solo, resultando na queda de produtividade da soja. Num experimento que avaliou a influência da compactação do solo decorrente do tráfego de máquinas sobre o desenvolvimento e produtividade da soja, Beutler et al., (2007) concluíram que a compactação do solo diminuiu o desenvolvimento radicular em profundidade em termos de distribuição, porém sem alterar a quantidade total de raízes e que a produtividade da soja diminuiu a partir de valores de DS acima de  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ , apesar da maior produtividade ter sido alcançada no solo ligeiramente compactado, provavelmente devido ao maior contato raiz-solo.

Reichert et al. (2009), indicou que valores acima de  $1,21 \text{ kg dm}^{-3}$  poderiam restringir a alongação radicular da soja, já entre  $1,36$  e  $1,68 \text{ kg dm}^{-3}$  poderiam impactar negativamente tanto o crescimento quanto a produtividade da soja em solos argilosos tropicais. Entretanto, Lovera, (2015), constatou aumento da produtividade da soja com aumento da densidade do solo, atestado espacialmente pelo semivariograma cruzado e pela co-krigagem direta entre ambos. Os sítios de maior produtividade da soja coincidiram com os sítios de densidade do solo na camada de  $0,10$ - $0,20 \text{ m}$  acima de  $1,44 \text{ kg dm}^{-3}$ .

De acordo com Favaretto et al. (2006), a relação direta entre causa e efeito resultante da presença de uma camada de solo compactada e do crescimento radicular das plantas é relativamente fácil de ser identificado, porque as raízes ficam concentradas nos primeiros centímetros de solo. Entretanto, relacionar diretamente a compactação do solo e a produção das culturas é mais difícil, porque o impedimento mecânico ao crescimento radicular não reduziria, por si só, a produtividade, sendo necessária a ocorrência de estresse nutricional e hídrico às plantas entre os períodos de emergência e maturação fisiológica. O efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento radicular é dependente do teor de água do solo; quando elevado, proporcionará plasticidade ao mesmo, diminuindo a resistência ao crescimento radicular.

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo é um sistema trifásico disperso. Desta forma, exclusivamente com base no volume, o solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, é aquele que apresenta  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de porosidade total ( $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, e  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de macroporosidade, responsável pela aeração do solo) e  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de volumes sólidos ( $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de matéria mineral e  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de matéria orgânica), conforme preceitos de KIEHL (1979).

#### **2.4 A geoestatística na pesquisa agrônômica**

Observações feitas em estudos agrônômicos do sistema solo-planta precisam incluir considerações sobre a variabilidade espacial e temporal dos solos em condições de campo. As variações no solo são decorrentes dos diferentes níveis de atuação dos processos de formação do solo e às diversas atuações do homem durante o cultivo de plantas. 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 (REICHARDT, 1985).

De acordo com Vieira (2000), quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a uma estatística relativamente nova: a geoestatística. Por estatística clássica entende-se aquela que utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias.

Esses dois ramos da estatística têm validade de aplicação em condições perfeitamente distintas. Para se determinar qual das duas deve ser usada em cada caso, utiliza-se o semivariograma que expressa a dependência espacial entre as amostras. Havendo dependência espacial, estimam-se valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, pelo método denominado krigagem. Além disso, muitas vezes, duas propriedades correlacionam-se entre si e no espaço, e uma é mais difícil ou mais cara para se medir no campo. A dependência espacial entre duas propriedades no espaço pode ser expressa pelo semivariograma cruzado, e se ele existir, o método chamado co-krigagem pode ser utilizado para estimar aquela mais difícil de se medir, utilizando-se os dados de ambas. Esses métodos oferecem a escolha de se medir a propriedade mais difícil com um número mínimo possível. A construção de mapas de contornos (isolinhas), e o delineamento de espaçamento e disposição ótima de amostras no campo são outras aplicações imediatas.

Na geoestatística, a dependência espacial apresentada pelos dados pode ser estimada pelo semivariograma, pressuposto da estacionaridade inerente à hipótese intrínseca, que é a representação gráfica do ajuste de modelos matemáticos aos dados observados. O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMBRAPA, 2004), definido por três parâmetros: o patamar ( $C_0 + C_1$ ), o efeito pepita ( $C_0$ ) e o alcance ( $A_0$ ). O efeito pepita é representado por um valor da semivariância, diferente de zero, quando a distância entre pontos amostrais é nula. Assim, representa aquela variância que não pôde ser detectada pelo semivariograma, seja pela necessidade de se coletar amostras a distâncias menores, seja pelo cometimento de um erro qualquer em alguma etapa do trabalho. O patamar representa a distância na qual toda a semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985).

O alcance da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são altamente iguais entre si. Seu conhecimento é de extrema importância à Agricultura de

Precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora, e assim poder efetuar a distribuição no terreno de um determinado insumo com taxas variáveis, ou com implementos para manejo físico em zonas específicas, onde há compactação, por exemplo.

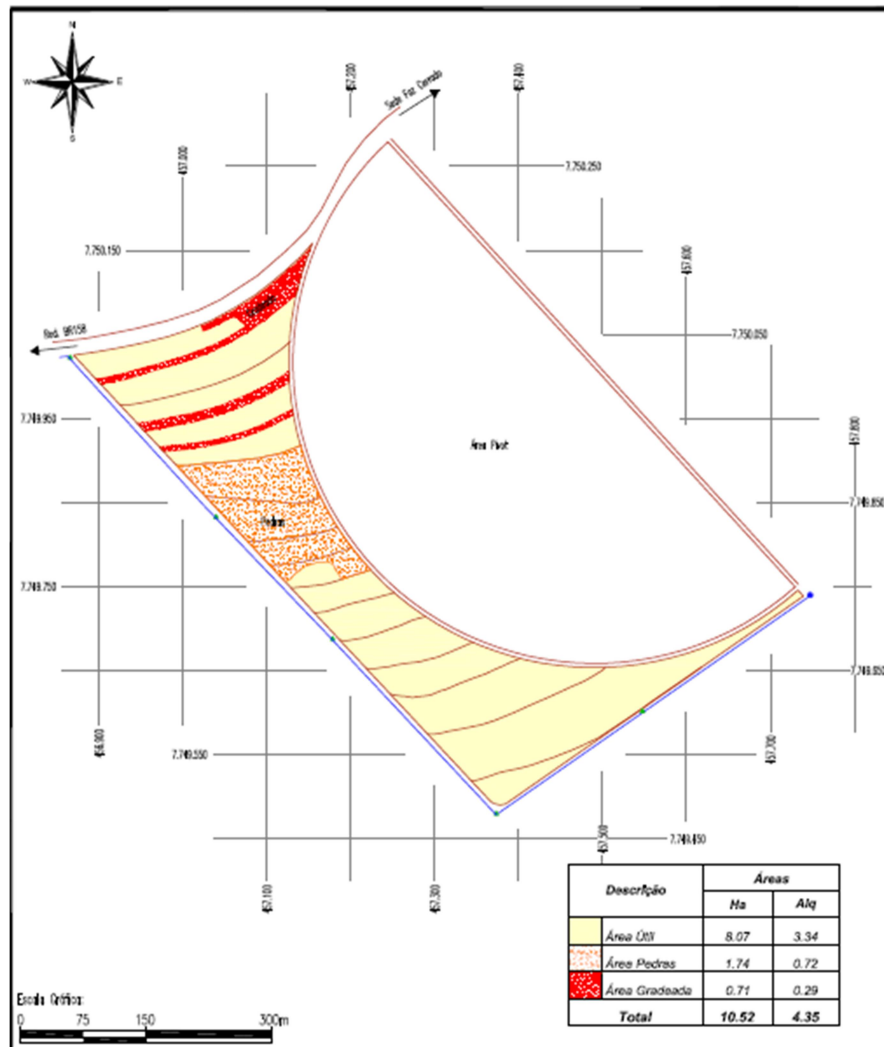
No Brasil, a pesquisa geoestatística tem sido implementada com o intuito de mensurar as correlações lineares e espaciais entre atributos do solo e características agrônômicas das culturas. Dessa forma, os valores de alcances das dependências espaciais observados para alguns atributos do solo e da planta foram entre: a) 23,0 e 60,6 m, para densidade do solo (SANTOS et al., 2006; LIMA et al., 2007; ROSA FILHO, 2008); b) 114m, para a massa de grãos por planta de soja (DALCHIAVON et al., 2011) e 6,1 e 41,1 m, para a produtividade de grãos de milho, feijão e soja (SANTOS et al., 2005; SANTOS et al., 2006; CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2006; ROSA FILHO, 2008; REICHERT et al., 2008; LOVERA, 2015). Com relação ao avaliador da dependência espacial (ADE), os valores observados para alguns atributos do solo e da planta foram entre: a) 50,1 a 90,7%, para a densidade do solo (SANTOS et al., 2006; LIMA et al., 2007; LOVERA, 2015) e b) 50,1 a 88,9%, para a produtividade de grãos de milho, feijão e soja (SANTOS et al., 2005; SANTOS et al., 2006; CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2006; ROSA FILHO, 2008; SIQUEIRA et al., 2008; REICHERT, et al., 2008; DALCHIAVON et al., 2011; LOVERA, 2015).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do campo experimental

A pesquisa no campo foi desenvolvida no ano agrícola de 2009/10, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, localizada no município de Selvíria (MS), próximo das coordenadas da latitude 22°23'S e da longitude 51°27'W, com precipitação média anual de 1300 mm e temperatura média de 23,7°C. O tipo climático é A<sub>w</sub>, segundo a classificação de Koeppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (DEMATTÊ, 1980). O levantamento planimétrico da área experimental está apresentado na Figura 1.

**Figura 1** - Levantamento planimétrico da área experimental



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.2 Histórico da área

O solo da área, na ocasião do experimento, vinha sendo cultivado sob sistema de semeadura direta há cinco anos, sendo as primeiras semeaduras antecedentes com o milho em sucessão, nos anos agrícolas de 2004/05, 2005/06 e 2006/07 e, respectivamente com sorgo e soja nos anos de 2007/2008 e 2008/2009. Até o presente mês (agosto/2017), está no décimo terceiro ano sob semeadura direta. O manejo da vegetação daninha ou infestante tem sido realizado com herbicida glifosato, para sua dessecação e posterior semeadura direta da soja nas águas.

### 3.3 Solo

O solo foi classificado por Demattê (1980) e reclassificado <sup>(1)</sup> segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013) como um LATOSSOLO VERMELHO Distróférrico típico argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulínítico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido (Typic Acrustox, very clayey, oxidic, isohiperthermic). No Quadro 1 consta a caracterização efetuada em 1980, por ocasião do levantamento taxonômico detalhado (DEMATTÊ, 1980).

### 3.4 Caracterização inicial do solo

Para a caracterização inicial do solo, coletaram-se vinte amostras deformadas e indeformadas em quatro camadas (0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m), que foram destinadas às análises físicas e químicas do solo. Os locais de coleta das amostras simples foram determinados aleatoriamente nas entrelinhas da cultura remanescente.

#### 3.4.1 Análises físicas do solo

Foram efetuadas as seguintes determinações físicas: a) granulometria (G), b) macroporosidade (MA), c) microporosidade (MI), d) porosidade total (PT), e) densidade do solo (DS), f) resistência mecânica à penetração (RP), g) umidade gravimétrica (UG), h) umidade volumétrica (UV) e i) capacidade de campo (CC), procedidas conforme EMBRAPA (1979) e Stolf (1991). No Quadro 2 consta a análise inicial de alguns atributos físicos do solo e na Figura 2, a resistência mecânica à penetração em função da profundidade do solo.

---

<sup>(1)</sup> CARVALHO, M. P. Comunicação pessoal. 2010. (Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - Faculdade de Engenharia – FE/UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil).

**Quadro 1:** Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
Ap	0-15	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; granular, pequena a média, moderado a forte; duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
A <sub>3</sub>	15-30	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; blocos e granular, moderado; friável, plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
B <sub>21</sub>	30-100	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/4); franco-argilo arenoso; maciço, poroso, muito fraco; macio, friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
B <sub>22</sub>	100-170+	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/6); franco-argilo arenoso; maciço, muito fraco; macio, muito friável, plástico e pegajoso.

Horizonte		Composição granulométrica da TFSA			Relação	Densidade
Símbolo	Profundidade	areia	silte	argila	silte/argila	do solo
	cm	.....g kg <sup>-1</sup> .....				kg dm <sup>-3</sup>
Ap	0-15	230	120	650	0,185	1,30
A <sub>3</sub>	15-30	210	120	670	0,179	1,20
B <sub>21</sub>	30-100	160	130	710	0,183	1,20
B <sub>22</sub>	100-170+	160	120	720	0,167	1,10

Horizonte		Complexo sortivo											
Símbolo	Profundidade	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	SB	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CTC	V%	m%	MO	
	cm	mg dm <sup>-3</sup>	.....mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> .....										g dm <sup>-3</sup>
Ap	0-15	1,0	17,0	15,4	0,8	33,2	1,0	40,0	74,2	45	3	16,6	
A <sub>3</sub>	15-30	0,0	1,5	1,6	0,5	3,6	8,0	33,0	4,46	8	69	13,6	
B <sub>21</sub>	30-100	1,0	0,5	0,4	0,4	1,3	5,0	32,0	3,83	3	79	10,2	
B <sub>22</sub>	100-170+	0,0	1,0	0,8	0,5	2,3	2,0	28,0	3,23	7	47	4,1	

Horizonte		pH			Ataque sulfúrico				Ki	Kr
Símbolo	Profundidade	H <sub>2</sub> O	KCl	ΔpH	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>		
	cm	.....dag kg <sup>-1</sup> .....								
Ap	0-15	5,1	4,8	-0,3	20,60	15,17	28,21	4,06	2,31	1,05
A <sub>3</sub>	15-30	4,9	4,3	-0,6	21,35	16,98	26,18	4,03	2,13	1,07
B <sub>21</sub>	30-100	4,9	4,2	-0,7	23,58	32,28	28,30	3,61	1,14	0,75
B <sub>22</sub>	100-170+	5,3	4,6	-0,7	22,59	16,84	27,89	3,67	2,28	1,10

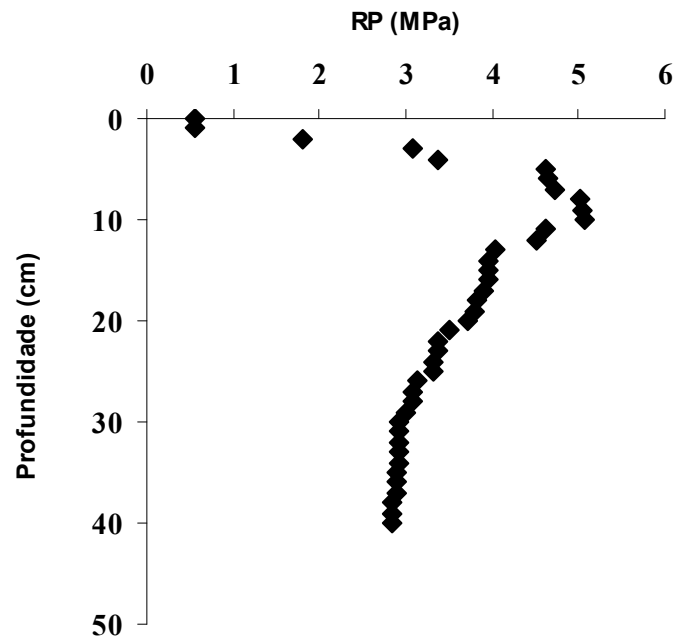
Fonte: Demattê (1980).

**Quadro 2:** Análise inicial dos atributos físicos do solo.

Atributo físico <sup>(a)</sup>									
Profundidade	Porosidade				Resistência à penetração/umidade			Capacidade de campo	
	MA	MI	PT	DS	RP	UG	UV	UG	UV
M	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			kg dm <sup>-3</sup>	MPa	kg kg <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0,00 – 0,10	0,091	0,399	0,490	1,424	3,494	0,210	0,299	0,203	0,289
0,10 – 0,20	0,075	0,403	0,478	1,450	4,025	0,228	0,331	0,199	0,289
0,20 – 0,30	0,085	0,413	0,498	1,376	3,209	0,239	0,329	0,210	0,289
0,30 – 0,40	0,108	0,422	0,530	1,202	2,892	0,269	0,323	0,226	0,272

Nota: onde: <sup>(a)</sup> MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 2 -** Resistência mecânica à penetração (MPa) em função das camadas do solo.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

### 3.4.2 Análises químicas do solo

Foram efetuadas as seguintes análises químicas de rotina para fins de fertilidade do solo: matéria orgânica (MO),  $\text{pH}_{(\text{CaCl}_2)}$ , P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , H+Al,  $\text{Al}^{3+}$ , soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%), procedidas conforme Raij et al. (2001). No Quadro 3 consta a análise inicial dos atributos químicos do solo.

**Quadro 3:** Análise inicial dos atributos químicos da fertilidade do solo.

Profundidade	Atributo químico <sup>(a)</sup>												
	MO	pH CaCl <sub>2</sub>	P	Complexo sortivo								V%	m%
				K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	Al <sup>3+</sup>	SB	CTC			
m	g dm <sup>-3</sup>		mg dm <sup>-3</sup>	mmol, dm <sup>-3</sup>				%					
0,00 – 0,10	27	5,1	15	4,4	19	17	33	1,0	40,4	73,4	55,0	2,0	
0,10 – 0,20	20	5,0	11	1,0	16	11	31	2,0	28,0	59,0	47,0	7,0	
0,20 – 0,30	15	4,9	5	0,6	12	9	28	3,0	21,6	49,6	44,0	12,0	
0,30 – 0,40	12	5,2	3	0,4	11	8	22	0,0	19,4	41,4	47,0	0,0	

Nota: onde: <sup>(a)</sup> MO = matéria orgânica, V% = índice de saturação por bases, m% = índice de saturação por alumínio.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

### 3.5 Implantação e condução da soja

A soja (*Glycine max* - L. Merrill), cultivar Conquista, foi semeada nos dias 21 e 22 de dezembro de 2009, após a dessecação das plantas daninhas com a associação dos herbicidas glifosato, (1,8kg i.a. ha<sup>-1</sup>) + clorimurum (12g i.a. ha<sup>-1</sup>). O cultivo atendeu às instruções agrícolas para as principais culturas econômicas do Estado de São Paulo (FAHL et al., 1998), tendo por base as características físico-químicas caracterizadas previamente à implantação do experimento (Quadros 2 e 3). O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m, com densidade final de 18 plantas por metro na linha de semeadura. Na adubação de semeadura utilizaram-se 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 0-20-20. As sementes foram tratadas com os fungicidas carboxina + thiram, (40 g i.a. ha<sup>-1</sup>) em 100 kg de semente e o inoculante utilizado foi o de marca comercial “masterfix” na dosagem de 100 g por saca de 40 kg de semente, equivalente a 3.10<sup>9</sup> células por grama de *Rhizobium* sp.

Os tratos culturais dispensados a soja foram realizados em etapas diversas; a) aplicação associada dos herbicidas clorimuron (12 g i.a. ha<sup>-1</sup>), lactofem (120 g i.a. ha<sup>-1</sup>) e imazetapir (30 g i.a. ha<sup>-1</sup>) no dia 20/01/10 e aplicação do gramínicida fenoxaprop-p-etílico (44 g i.a. ha<sup>-1</sup>) no dia 04/02/10 para o controle de daninhas e infestantes; b) aplicação

associada do fungicida azoxistrobina (60 g i.a. ha<sup>-1</sup>) e ciproconazol (24 g i.a. ha<sup>-1</sup>) e inseticida cipermetrina (50 g i.a. ha<sup>-1</sup>) nos dias 06 e 19/02/10 e no dia 22/03/10 aplicação dos inseticidas metomil (129 g i.a. ha<sup>-1</sup>) e cipermetrina (50 g i.a. ha<sup>-1</sup>). As fotos do desenvolvimento da cultura (março/2010) e do seu aspecto geral próximo ao período da colheita, estaqueamento e vista da área após a colheita da soja constam, respectivamente, nos APÊNDICES B e C.

### **3.6 Implantação e caracterização das malhas experimentais no campo**

Para a implantação da malha experimental foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas no maior lançante da soja. Para tanto, efetuou-se o estaqueamento global e aleatório da malha experimental na ocasião da coleta dos dados de planta e solo, utilizando-se trena com 50 m para determinar as coordenadas x e y, possibilitando a avaliação da dependência espacial entre os valores observados.

Na direção do eixo x foram alocadas 18 linhas distanciadas 39 m uma da outra, com o número de 18 pontos amostrais variáveis em cada uma delas, com distâncias variando entre 18 e 21 m na direção do eixo y, de maneira que no interior da área fossem distribuídos 99 pontos amostrais. A área compreendeu aproximadamente 100.000 m<sup>2</sup> (10 ha). Desta forma, obteve-se uma média de 10 pontos amostrais por hectare. A representação esquemática dos eixos x e y para implantação e estaqueamento dos pontos da malha experimental consta no Apêndice D.

### **3.7 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados**

Determinaram-se os atributos do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral, oriundos da coleta dos dados da planta posicionada no centro e de suas circunvizinhas. Para isso, tais amostras foram originadas da coleta de quatro linhas de semeadura, as quais abrigaram uma largura de 1,80 m. Uma vez que foi considerada a mesma distância para o comprimento, a área útil de coleta de plantas de cada ponto amostral foi de 3,24 m<sup>2</sup>. A representação esquemática da área útil (3,24 m<sup>2</sup>) encontra-se no Apêndice E.

#### ***3.7.1 Determinação dos atributos físicos do solo***

Os atributos físicos do solo amostrados nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (camadas convencionadas por números ímpares e pares, respectivamente), foram os seguintes: densidade do solo pelo método do anel volumétrico (DS1 e DS2), densidade do solo pelo

método do torrão parafinado (DS3 e DS4), densidade de partícula do solo pelo método do balão volumétrico (DP1 e DP2), densidade da partícula do solo pelo método do balão volumétrico modificado (DP3 e DP4) e a porosidade total do solo (PT1, PT2, PT3, PT4, PT5, PT6, PT7, PT8), calculada pelas relações,  $PT1 = (1-DS1/DP1)$ ,  $PT2 = (1-DS2/DP2)$ ,  $PT3 = (1-DS1/DP3)$ ,  $PT4 = (1-DS2/DP4)$ ,  $PT5 = (1-DS3/DP1)$ ,  $PT6 = (1-DS4/DP2)$ ,  $PT7 = (1-DS3/DP3)$  e  $PT8 = (1-DS4/DP4)$ .

### 3.7.1.1 Densidade do solo pelo método do anel volumétrico

Para determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico (método I) realizou-se a coleta de uma massa de solo com estrutura indeformada, utilizando um anel (cilindro metálico) de volume conhecido (EMBRAPA, 1997). Em seguida, efetuou-se o “toaleta” da amostra, que consistiu na retirada do excesso de terra aderido ao anel, tomando o cuidado para não compactar a amostra e para garantir todo o preenchimento do volume do anel com solo. Os detalhes das etapas de coleta das amostras para determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico constam no Apêndice F.

O cálculo foi efetuado pela relação entre a massa de solo seco (MS) em estufa (110°C) por 24 h, determinada pela pesagem com balança analítica com precisão de 0,01 g e o volume total (VT), oriundo do volume de sólidos (Vs) mais o volume poroso (Vp) ocupado pela água e ar, que no caso é o próprio volume do anel.

$$DS1 \text{ e } DS2 = MS/VT \dots\dots\dots(1)$$

onde:

**DS1** = densidade do solo pelo método do anel volumétrico ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,00-0,10 m

**DS2** = densidade do solo pelo método do anel volumétrico ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,10-0,20 m

**MS** = massa do solo seco (kg)

**VT** = volume do anel ( $\text{dm}^3$ )

### 3.7.1.2 Densidade do solo pelo método do torrão parafinado

Para a determinação da densidade do solo pelo método do torrão parafinado (método II) foi realizada a coleta dos torrões de solo com estrutura indeformada, conforme descrito por Kiehl (1979) e Blake e Hartge (1986).

Com um enxadão foram retirados “blocos” de solo dos quais se retiraram os torrões e com uma faca procedeu-se a padronização do tamanho dos mesmos. O procedimento consistiu em impermeabilizar os torrões com parafina derretida (60°C) para imergi-los em água para determinar o volume. Os detalhes das etapas de coleta e dos procedimentos de preparo das amostras para determinação da densidade do solo pelo método do torrão parafinado constam no Apêndice G.

A determinação do volume dos torrões parafinados correspondeu ao volume de água deslocado (Princípio de Arquimedes). O cálculo da densidade foi obtido pela relação entre a massa do torrão seco (MTS) e o volume do torrão (VT), através da seguinte fórmula:

$$\mathbf{DS3 \text{ e } DS4 = MTS/VT} \dots\dots\dots (2)$$

onde:

**DS3** = densidade do solo pelo método do torrão parafinado ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,00-0,10 m

**DS4** = densidade do solo pelo método do torrão parafinado ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,10-0,20 m

**MTS** = massa do torrão seco (kg)

**VT** = volume do torrão ( $\text{dm}^3$ )

### 3.7.1.3 Densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico

A determinação da densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico (DP1 e DP2), dada pelo método III, foi realizada conforme descrito por Kiehl (1979) e Embrapa (1997).

A preparação das amostras de solo coletadas a campo, depois de secas ao ar por 96 h, consistiu na maceração e peneiramento do solo (peneira ABNT nº 10) com posterior secagem em estufa a 105°C por 24 h.

Transferiu-se 20 g de solo, resfriado em dessecador, para balão volumétrico de 50 ml limpo, seco e pesado, previamente aferido com bureta de 50 ml para determinação do seu

volume real no traço do menisco. Adicionou-se álcool etílico (92°GL) na bureta, ajustando o volume com a capacidade da mesma, liberando o álcool até a metade do volume do balão, agitando-o em movimento circulares para a eliminação do ar aprisionado entre as partículas do solo, completando posteriormente o volume do balão até o traço do menisco, efetuando-se a leitura na bureta do volume de álcool consumido.

Utilizou-se a seguinte fórmula para o cálculo da DP:

$$\mathbf{DP1 \ e \ DP2 = (MBS - MB)/(VB - VA).....( 3 )}$$

onde:

**DP1** = densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,00-0,10 m

**DP2** = densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) na camada de 0,10-0,20 m

**MB** = massa do balão volumétrico (kg)

**MBS** = massa do balão volumétrico com o solo (kg)

**VB** = volume real do balão volumétrico ( $\text{dm}^3$ )

**VA** = volume de álcool consumido para completar o balão volumétrico com o solo ( $\text{dm}^3$ )

A diferença entre MBS e MB corresponde a massa do solo seco em estufa (MS), assim como a diferença entre VB e VA, o volume de sólidos (VS). Portanto, o cálculo final foi dado por:

$$\mathbf{DP1 \ e \ DP2 = MS/VS.....( 4 )}$$

#### 3.7.1.4 Densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico modificado

A determinação da densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico modificado (DP3 e DP4), dada pelo método IV foi realizada conforme descrito por Gubiani et al. (2006).

A preparação das amostras de solo consistiu na maceração e peneiramento do solo (peneira ABNT nº 10) e secagem em estufa a 105°C por 24 h. Transferiu-se 20 g de solo,

resfriado em dessecador, para balão volumétrico de 50 ml limpo, seco e pesado, previamente aferido com bureta de 50 ml para determinação do seu volume real no traço do menisco.

Procedeu-se a adição de álcool etílico (92°GL) com auxílio de pisseta até a metade do volume do balão contendo o solo, seguido de agitação manual até a eliminação do ar aprisionado entre as partículas do solo, completando posteriormente o volume do balão até próximo ao traço de aferição. O ajuste final do volume do álcool com o traço de aferição do balão foi realizado gotejando-se álcool com uso de bureta, tomando-se a massa do balão contendo o solo mais o álcool.

A determinação da densidade do álcool foi efetuada adicionando-se álcool na bureta até ajustar a sua capacidade e tomando-se a massa do álcool contido na bureta num Becker previamente pesado. A densidade do álcool foi obtida através da divisão da massa do álcool pelo seu volume (50 ml), usando-se como valor final a média de quatro repetições. Assim, a DP foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{DP3 \ e \ DP4 = (MBS - MB) / [VB - (MBSA - MBS) / DA] \dots\dots\dots( 5 )}$$

onde:

**DP3** = densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico modificado (kg dm<sup>-3</sup>) na camada de 0,00-0,10 m

**DP4** = densidade de partículas do solo pelo método do balão volumétrico modificado (kg dm<sup>-3</sup>) na camada de 0,10-0,20 m

**MB** = massa do balão volumétrico (kg)

**MBS** = massa do balão volumétrico com o solo (kg)

**MBSA** = massa do balão volumétrico com o solo e com o álcool (kg)

**VB** = volume real do balão volumétrico (dm<sup>3</sup>)

**DA** = densidade do álcool (kg.dm<sup>-3</sup>)

A diferença entre as equações apresentadas para a DP refere-se aos termos que representam o volume do álcool consumido. No método do balão volumétrico, o volume do álcool é determinado diretamente por leitura na bureta de 0,1 ml de precisão, enquanto neste é determinado indiretamente pelo termo [(MBSA-MBS)/DA], que representa a massa do álcool dividida pela sua densidade.

### 3.7.1.5 Porosidade total do solo

A porosidade total do solo (PT) representa o volume do solo ocupado pelo ar e água, ou seja, o volume de poros ( $V_p$ ), em relação ao volume total do solo ( $V_p + V_s$ ). Sua determinação foi efetuada a partir dos valores de DS e DP, da seguinte forma:

$$PT1 = [1 - (DS1/DP1)] \dots \dots \dots (6)$$

na camada de 0,00-0,10 m

$$PT2 = [1 - (DS2/DP2)] \dots \dots \dots (7)$$

na camada de 0,10-0,20 m

$$PT3 = [1 - (DS1/DP3)] \dots \dots \dots (8)$$

na camada de 0,00-0,10 m

$$PT4 = [1 - (DS2/DP4)] \dots \dots \dots (9)$$

na camada de 0,10-0,20 m

$$PT5 = [1 - (DS3/DP1)] \dots \dots \dots (10)$$

na camada de 0,00-0,10 m

$$PT6 = [1 - (DS4/DP2)] \dots \dots \dots (11)$$

na camada de 0,10-0,20 m

$$PT7 = [1 - (DS3/DP3)] \dots \dots \dots (12)$$

na camada de 0,00-0,10 m

$$PT8 = [1 - (DS4/DP4)] \dots \dots \dots (13)$$

na camada de 0,10-0,20 m

onde:

PT = porosidade total do solo ( $m^3 m^{-3}$ )

DS = densidade do solo ( $kg dm^{-3}$ )

DP = densidade de partículas do solo ( $kg dm^{-3}$ )

### 3.7.2 Determinação dos componentes de produção da soja

Os componentes de produção da soja determinados foram: número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG), massa de grãos por planta (MGP), população de plantas (POP) e altura de plantas (ALT) e produtividade de grãos obtida (PGO).

O NVP foi obtido através da média do total das vagens de dez plantas colhidas da área útil. O NGV foi determinado pela média do total de grãos oriundos da debulha dessas vagens, enquanto que a MCG, pela pesagem de cem grãos e, por fim, determinou-se a MGP, calculada pela média do peso total dos grãos oriundos das dez plantas colhidas, ambos expressos em gramas.

Para a determinação da PGO coletaram-se todas as plantas da área útil que foram secas ao sol e posteriormente submetidas à trilha mecânica. Após a debulha, os grãos foram pesados e retirou-se uma sub-amostra para determinação da umidade. A massa de grãos foi corrigida para 13% umidade conforme a equação proposta por Beutler et al. (2004):

$$P = \frac{P_i(100-U_i)}{100-U_f} \dots \dots \dots (14)$$

onde:

**P** = é a produção final (0,13 kg kg<sup>-1</sup> de umidade nos grãos), em gramas (g)

**P<sub>i</sub>** = produção inicial da amostra (g)

**U<sub>i</sub>** = umidade inicial da amostra (kg kg<sup>-1</sup>)

**U<sub>f</sub>** = umidade final da amostra (0,13 kg kg<sup>-1</sup>)

A produção de grãos foi transformada em kg ha<sup>-1</sup>.

### 3.8 Análise estatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva auxiliada pela estatística clássica. Utilizando-se o software SAS (SCHLOTZHAVER; LITTEL, 1997) foram calculadas a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Identificaram-se os *outliers*, conforme identificação do gráfico de ramos e folhas, efetuando-se a substituição deles pelo valor médio dos circunvizinhos e por fim, foi efetuada a análise da distribuição de frequência. A variabilidade dos atributos foi determinada de acordo com o coeficiente de variação (CV), classificada como baixa (CV ≤ 10%), média (10% < CV ≤ 20%), alta (20% < CV ≤ 30%) e muito alta (CV > 30%), conforme Pimentel Gomes e Garcia (2002).

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, será pela mediana, ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (SPIEGEL, 1985). Para testar a hipótese de normalidade, ou de

lognormalidade dos atributos ( $x$ ), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele a estatística  $W$  testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Assim, no caso de dados transformados na forma logarítmica ( $y = \ln x$ ),  $W$  testa a hipótese nula de que os valores  $y_i$  provêm de uma distribuição normal, isto é, os dados não transformados ( $x_i$ ) ajustam-se a uma distribuição lognormal. Por outro lado, na montagem do quadro que sintetizou a análise descritiva inicial dos atributos, os valores da média, mediana, moda, mínimo e máximo foram retrotransformados pelo uso de  $x = 10^{(\log x)}$ .

A matriz de correlação foi montada, objetivando efetuar as regressões lineares para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta). O objetivo foi estudar a correlação linear entre eles, na tentativa de procurar selecionar aqueles que sejam semelhantes, e que provavelmente poderão apresentar semivariograma cruzado e, portanto, cokrigagem.

De acordo com Dalchiavon (2010), quando entre dois atributos quaisquer houver elevado e significativo coeficiente de correlação de Pearson e ambos derem semivariograma, a cokrigagem com certeza existirá. Entretanto, se apresentarem baixo e não significativo coeficiente de correlação de Pearson, porém, ambos apresentarem semivariograma, a cokrigagem pode ou não existir. Para tanto, foram utilizadas a planilha de cálculos Excel e o pacote computacional SAS.

Para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional  $GS^+$  (ROBERTSON, 1998).

O ajuste do semivariograma, em função dos modelos, foi efetuado pela seleção inicial de: a) o maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ); b) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**); e c) o maior avaliador da dependência espacial (**ADE**). A decisão final do modelo representante do ajuste foi por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita ( $C_0$ ), alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0+C$ ).

O alcance é importante para a interpretação dos semivariogramas por indicar a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados numa área cujo raio é o alcance, são mais semelhantes entre si, do que os separados por distâncias maiores. O alcance depende do tamanho da área amostrada e da escala de observação, sendo tanto maior quanto maior for o intervalo entre medidas (TRANGMAR et al., 1985).

A análise do avaliador da dependência espacial (**ADE**) seguiu as sugestões de Cambardella et al. (1994), modificadas por Robertson (1998) conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C / (C + C_0)] \cdot 100 \dots \dots \dots (15)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; **C+C<sub>0</sub>** é o patamar.

A interpretação proposta para o **ADE** foi conforme a sugestão de Dalchiavon (2010) da seguinte maneira: a)  $\text{ADE} < 20\%$  indicando variável espacial de dependência muito baixa (**MB**); b)  $20\% \leq \text{ADE} < 40\%$  indicando variável espacial de dependência baixa (**BA**); c)  $40\% \leq \text{ADE} < 60\%$  indicando variável espacial de dependência média (**ME**); d)  $60\% \leq \text{ADE} < 80\%$  indicando variável espacial de dependência alta (**AL**), e e)  $80\% \leq \text{ADE} < 100\%$  indicando variável espacial de dependência muito alta (**MA**).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise descritiva dos dados

#### 4.1.1 Variabilidade dos atributos estudados

##### 4.1.1.1 Componentes de produção da soja

No Quadro 4 consta a análise descritiva dos componentes de produção da soja. Conforme Pimentel Gomes e Garcia (2002) o NGV e a MCG apresentaram baixa variabilidade, com valores de CV de 5,7 e 6,4%, respectivamente, enquanto que ALT, POP e PGO, média variabilidade (11,3, 12,2 e 19,9%) e MGP e NVP, alta variabilidade (22,6 e 23,5%).

**Quadro 4:** Análise descritiva inicial dos componentes de produção da soja produzida num Latossolo Vermelho Distroférico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS)

Atributos(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor		Desvio		Coeficiente		Probabilidade do teste			
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	PR<w	DF
NVP	25,0	24,0	14,1	39,2	5,9	23,5	-0,624	0,160	0,157	LN
NGV	2,0	2,0	1,7	2,4	0,1	5,7	1,513	0,128	0,007	IN
MCG (g)	15,8	16,1	13,1	17,7	1,0	6,4	-0,050	-0,394	0,084	NO
MGP (g)	6,9	6,9	3,7	10,7	1,6	22,6	-0,568	0,312	0,093	NO
POP (pl m <sup>-2</sup> )	36,5	37,1	26,6	43,6	4,4	12,2	-0,911	-0,427	0,001	IN
ALT (cm)	75,8	76,6	48,9	94,5	8,5	11,3	0,169	-0,308	0,751	NO
PGO (kg ha <sup>-1</sup> )	2659	2563	1365	4179	528,7	19,9	0,497	0,537	0,051	NO

Nota: <sup>(a)</sup> NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por planta; MCG = massa de cem grãos; MGP = massa de grãos por planta; POP = população de plantas por metro quadrado; ALT = altura da planta; PGO = produtividade obtida de grãos <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência dos dados, sendo NO, LN e IN respectivamente do tipo normal, lognormal, e indeterminada.

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A variabilidade dos componentes de produção NVP, NGV, MGP, POP, com exceção da PGO, foi da mesma magnitude da constatada por Dalchiavon et al. (2011).

A baixa variabilidade da massa de cem grãos (MCG), também foi constatada por Narimatsu (2004), Rosa Filho (2008), Queiroz (2009) e Lovera (2015) com CV, respectivamente de, 4,9, 5,7, 6,2 e 8,8%. Narimatsu (2004) constatou baixa variabilidade do NGV (8,6%), média da ALT (11,4%) e alta do NVP (22,5%), corroborando com os resultados obtidos. Contudo, a média variabilidade da POP (12,2%) não foi verificada no trabalho de Narimatsu (2004) que constatou CV de 6,14%. Por outro lado, os CV dos atributos NVP e

ALT foram superiores aos determinados por Queiroz (2009), que foram, respectivamente de 19,1 e 6,9%, com o mesmo solo e cultura que o do presente estudo.

A produtividade de grãos obtida da cultura da soja (PGO) apresentou médio coeficiente de variação (19,9%). Assim, a variabilidade foi maior em relação à determinada por Rosa Filho (2005) e de mesma magnitude à de Rosa Filho (2008), que evidenciaram baixa e média variabilidade (7 e 13,7%) respectivamente, neste mesmo solo e cultivar de soja. Entretanto, foi inferior às constatadas por Lovera (2015), de 39% na mesma área e solo desta pesquisa.

#### ***4.1.1.2 Atributos do solo***

A variabilidade da DS e da DP, independentemente dos métodos de determinação, foi baixa em ambas as camadas, com coeficientes de variação entre 1,9-7,2% (Quadro 5). Assim, corroboram com a variabilidade dos dados de DS os resultados constatados por Souza et al. (2001), Carvalho et al. (2002), Mesquita et al. (2003), Secco et al. (2005), Santos et al. (2006), Lima et al. (2007), Rosa Filho (2008), Montanari (2009), Queiroz (2009), Andreotti et al. (2010) e Lovera (2015), com CV entre 3-10%.

Ressalta-se que a variabilidade dos valores de DS (3,9-7,2%) sofre influência significativa do manejo despendido à cultura, que é essencialmente mecanizado. A pressão exercida no solo pelas máquinas e implementos utilizados nos tratos culturais e na colheita da soja, pode gerar compactação adicional do solo em determinadas regiões na área, principalmente quando efetuadas em condições de elevada umidade do solo.

Quanto à variabilidade dos dados da DP, corroboram as determinações de Lima (2007), num Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta (CV=2%) e as de Montanari (2009) num Latossolo Vermelho Distroférrico sob cultivo mínimo e sob plantio direto, com variabilidade entre 4,6-5,5%. A menor amplitude de variação dos dados de DP em relação aos da DS, atestada pelos CV entre 1,9 e 3,0%, é plausível, porque, ao contrário da DS, não se considera o volume poroso do solo na sua determinação, apenas o da fração sólida, o que impossibilita detectar as alterações na estrutura do solo (BRADY, 1990), decorrentes do manejo cultural. Provavelmente, a variabilidade da DP esteja mais relacionada com erros decorrentes de sua determinação do que com as variações dos constituintes da fração sólida do solo.

**Quadro 5:** Análise descritiva inicial dos atributos de um Latossolo Vermelho Distroférico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS)

Atributos(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor		Desvio		Coeficiente		Probabilidade do teste			
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	PR<w	DF
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,442	1,446	1,153	1,666	0,104	7,2	0,348	-0,522	0,088	NO
DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,460	1,462	1,300	1,604	0,066	4,5	-0,474	-0,038	0,677	NO
DS3 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,545	1,548	1,293	1,688	0,073	4,7	0,517	-0,457	0,193	NO
DS4 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,539	1,539	1,407	1,685	0,059	3,9	-0,062	0,221	0,430	NO
DP1 (kg dm <sup>-3</sup> )	2,582	2,597	2,354	2,703	0,077	3,0	0,320	-0,974	10 <sup>-4</sup>	IN
DP2 (kg dm <sup>-3</sup> )	2,615	2,632	2,410	2,732	0,062	2,4	0,503	-0,738	2.10 <sup>-4</sup>	IN
DP3 (kg dm <sup>-3</sup> )	2,571	2,575	2,385	2,721	0,065	2,5	0,604	-0,339	0,131	NO
DP4 (kg dm <sup>-3</sup> )	2,600	2,600	2,477	2,728	0,048	1,9	0,162	0,144	0,733	NO
PT1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,441	0,443	0,326	0,562	0,048	11,0	0,043	0,621	0,621	NO
PT2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,441	0,438	0,366	0,504	0,030	6,7	-0,437	-0,001	0,679	NO
PT3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,438	0,435	0,337	0,554	0,046	10,5	0,158	0,278	0,375	NO
PT4 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,438	0,437	0,379	0,500	0,030	6,8	-0,642	0,119	0,217	NO
PT5 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,401	0,401	0,301	0,516	0,038	9,4	0,153	0,012	0,862	NO
PT6 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,410	0,409	0,301	0,467	0,028	6,8	1,517	-0,478	0,054	NO
PT7 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,398	0,398	0,335	0,508	0,035	8,7	-0,044	0,427	0,059	NO
PT8 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,408	0,410	0,326	0,466	0,028	6,8	0,392	-0,404	0,222	NO

Nota: <sup>(a)</sup> DS1 e 2 e DS3 e 4 são respectivamente as densidades do solo determinadas pelos métodos I e II; DP1 e 2 e DP3 e 4 são respectivamente as densidades da partícula do solo determinadas pelos métodos III e IV, e PT1 a 8 são respectivamente as porosidades totais do solo determinadas pelos métodos I, II, III e IV, nas profundidades ímpares (0,00-0,10 m) e pares (0,10-0,20 m); <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência dos dados, sendo NO e IN respectivamente do tipo normal e indeterminada.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

De maneira geral, a PT apresentou baixa variabilidade, corroborando os trabalhos de Queiroz (2009), Andreotti et al. (2010) e Lovera (2015), com CV, respectivamente, entre 5,7-6,5%; 1 a 6,5% e 6,9 a 8,9%. Entretanto, a PT1 (11%) e a PT3 (10,5%) apresentaram média variabilidade. Corroboram para os resultados as constatações de Souza et al. (2004), num Latossolo Vermelho Eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de 30 anos (CV=17%) e Montanari (2009) com feijão num Latossolo Vermelho Distroférico sob cultivo mínimo e sob plantio direto, com CV entre 11,5-14,3%.

Cabe salientar que as mesmas considerações feitas para embasar a variabilidade dos dados determinados de DS, são plausíveis, também, para a PT, cujo cálculo considera o espaço poroso do solo. Segundo Camargo et al. (2008), o coeficiente de variação permite

comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial.

#### ***4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos***

##### *4.1.2.1 Componentes de produção da soja*

Conforme consta no Quadro 4, exceto para os atributos NVP, NGV e POP que apresentaram, respectivamente, distribuição de frequência do tipo lognormal e indeterminado, os demais atributos foram do tipo normal, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,128 e 0,537 e negativa entre -0,427 e -0,308. Os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,169 e 1,513 e negativa entre -0,911 e -0,050. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, esses atributos não foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,051 a 0,751. Resultados semelhantes para a produção de grãos, com distribuição de frequência do tipo normal, também foram encontrados por Freddi (2003), Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006), Freddi et al. (2006), Marins (2006), Santos et al. (2006), Martins (2007), Megda et al. (2008), Rosa Filho (2008), Montanari (2009) e Queiroz (2009) e Lovera (2015).

##### *4.1.2.2 Atributos do solo*

Todos os atributos do solo avaliados apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, exceto DP1 e DP2 que foi do tipo indeterminado, em ambas camadas (Quadro 5). Os coeficientes de assimetria positiva ficaram entre 0,012 e 0,621 e negativa entre -0,974 e -0,001. Os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,043 e 1,517, e negativa entre -0,642 e -0,044. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, esses atributos não foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que suas respectivas probabilidades foram de 0,054 a 0,862.

Dessa forma, a distribuição de frequência do tipo normal, constatada para a maioria dos atributos pesquisados no trabalho, ficou de acordo com os seguintes autores, classificados conforme atributo: a) DS (CARVALHO et al., 2003, MESQUITA et al., 2003, SOUZA et al., 2004, MARINS, 2006, SANTOS et al., 2006, ROSA FILHO, 2008, MONTANARI, 2009, QUEIROZ, 2009), b) DP (LIMA, 2007, MONTANARI, 2009), c) PT (CARVALHO et al.,

2003, MESQUITA et al., 2003, SOUZA et al., 2004, SANTOS et al., 2006, ROSA FILHO, 2008, MONTANARI, 2009, QUEIROZ, 2009, LOVERA, 2015).

#### **4.1.3 Valores médios dos atributos estudados**

##### *4.1.3.1 Componentes de produção da soja*

Os valores médios dos componentes de produção NVP, NGV, MCG, MGP, POP e ALT da soja foram, respectivamente de, 25, 2,0, 15,8, 6,9, 36,5 e 75,8. (Quadro 4). Dalchiavon et al. (2011) constataram valores médios do NVP, NGV e da MGP, respectivamente de, 72,2, 2,2 e 23g. O NVP determinado por Gouvêa Filho (2003), Queiroz (2009) e Lovera (2015) foi, respectivamente de, 44, 36,6 e 30,5. Medina (1994) verificou que o retardamento da época de semeadura resultou em menor NVP. Lazarini (1995), avaliando diferentes épocas de semeadura de diversos genótipos, constatou, também, que o atraso da semeadura, da primeira época (02/12) para a quinta época (10/03) resultou na diminuição do NVP. Tais verificações corroboram com o baixo valor do NVP constatado.

O NGV (2,0) foi semelhante aos determinados por Narimatsu (2004) e Lovera (2015), respectivamente de 1,8 e 1,9. A MCG (15,8 g) foi praticamente igual à constatada por Lovera (2015) de 15,9 g, porém inferior a determinada por Carvalho (1999), de 18,4 g. Resultados obtidos por Medina (1994) e Lazarini (1995) proporcionaram MCG semelhantes em diferentes épocas de semeadura, sugerindo que as variações são muito determinadas em função dos genótipos utilizados. Os valores médios da POP (36,5 pl m<sup>-2</sup>) superaram os de Narimatsu (2004) de 31,97 pl m<sup>-2</sup>, porém foram inferiores aos recomendados pela Embrapa (2011) de 40 pl m<sup>-2</sup>. A ALT média (75,8 cm) superou à verificada por Queiroz (2005) e Queiroz (2009), respectivamente de, 53,0 e 68,0 cm, porém atendeu a altura de planta admitida como desejável para a colheita mecânica de 65 cm (BONETTI, 1983).

Conforme consta no Quadro 4, a PGO média foi de 2659 kg ha<sup>-1</sup>, 19 % menor em relação à média nacional de 3273 kg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2017) e inferior às constatadas por Rosa Filho (2008), de 3318 kg ha<sup>-1</sup>, Queiroz (2009), de 3097 kg ha<sup>-1</sup> e de Dalchiavon et al. (2011), de 4.639 kg ha<sup>-1</sup>. Certamente, os baixos valores dos componentes de produção não garantiram uma apreciável produtividade, evidenciando os efeitos dos veranicos ocorridos durante o período reprodutivo da soja (Apêndice A), entretanto, ainda foi superior à produtividade de 1215 kg ha<sup>-1</sup> constatada por Lovera (2015), numa pesquisa realizada na mesma área e com semeadura direta da soja no mês de novembro.

Assim, tanto a semeadura tardia da soja, fora da época recomendada para a região, quanto a irregularidade das precipitações, contribuíram para a produtividade relativamente baixa da soja. De acordo com Lazarini (2001), a região de Selvíria-MS pode ser considerada de alto risco para a semeadura da soja, devido às elevadas temperaturas que ocorrem durante o verão e com grandes probabilidades de ocorrência de veranicos.

Segundo as recomendações da Embrapa (2011), a necessidade hídrica total da soja, visando máximo rendimento, varia de 450 a 800 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo dispendido à cultura e da duração do ciclo. A disponibilidade de água é mais importante em dois períodos de desenvolvimento; na germinação e emergência e na floração-enchimento de grãos, cuja necessidade é de 7 a 8 mm dia<sup>-1</sup>.

Conforme os dados climatológicos fornecidos pela estação meteorológica durante a condução do experimento (Apêndice A), a precipitação total durante o ciclo da cultura foi de 645 mm, dentro da faixa de necessidade (450 a 800 mm/ciclo), entretanto, observou-se que a distribuição das precipitações foi irregular, com concentração de 72% do volume total nos meses de dezembro e janeiro. Assim, durante os estádios de floração-enchimento de grãos, houve veranicos nos meses de fevereiro (02/02 a 08/02 e 20/02 a 26/02/2010), março (01/03 a 14/03; 18/03 a 22/03; 24/03 a 28/03/2010) e em quase todo o mês de abril, exceto pelas precipitações dos dias 02/04 a 06/04/2010. As precipitações totais dos referidos meses, respectivamente de, 76,7, 72,9 e 31,75 mm, foram insuficientes, portanto, para atender a demanda hídrica da cultura, que seria de 196, 248 e 120 mm, considerando 7 mm dia<sup>-1</sup> para o mês de fevereiro (R1 a R3) e 8 mm dia<sup>-1</sup> para o mês de março (R4 a R6) e para a primeira quinzena do mês de abril (R7.1 a R8.2), conforme as recomendações da Embrapa (2011).

#### 4.1.3.2 Atributos do solo

Em relação aos atributos físicos do solo avaliados (Quadro 5), independentemente da metodologia utilizada, constatou-se que o solo evidenciou um relativo estado de compactação, atestado pelos elevados valores de DS, comparativamente aos valores de referência sugeridos por Oliveira e Moniz (1975), para um Latossolo Vermelho Distroférico em condições de solo virgem e sob mata natural (0,98 e 1,13 kg dm<sup>-3</sup>). Contudo, ficaram compreendidos dentro da faixa de valores mencionados por Reichart (1985), entre 0,9 a 1,6 kg dm<sup>-3</sup> para os solos argilosos. Semelhantemente, corroboraram os valores obtidos da PT, também inferiores em relação à PT preconizada como ideal, de 0,50m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> do volume total do solo (KIEHL, 1979).

De acordo com o Quadro 5, os valores médios da DS determinados pelo método do anel volumétrico (DS1 e DS2) foram menores comparativamente aos do método do torrão

parafinado (DS3 e DS4), em ambas as camadas, com valores respectivamente de 1,442, 1,460; 1,545 e 1,539 kg dm<sup>-3</sup>. O método do anel conseguiu caracterizar nitidamente o aumento da DS da camada de 0,00-0,10 para a de 0,10-0,20 m, enquanto que os valores obtidos da DS pelo método do torrão foram muito próximos em ambas as camadas, deixando de evidenciá-lo. Por outro lado, Rosa Filho (2008), constatou menores valores da DS (método do anel), respectivamente de 1,401 kg dm<sup>-3</sup> e de 1,383 kg dm<sup>-3</sup> nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, na pesquisa que avaliou a produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico, sob plantio direto, próximo as coordenadas desta pesquisa.

Os valores da DS1 e DS2 superaram os determinados na ocasião da caracterização inicial do solo (Quadro 2), indicando que o tráfego das máquinas e dos implementos durante a implantação, condução e colheita da soja, aumentou a DS nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Também foram maiores em relação aos constatados por Lovera (2015), de 1,359 e de 1,411 kg dm<sup>-3</sup>, nas respectivas camadas, oriundos da mesma área experimental, sugerindo que pode estar ocorrendo a diminuição do estado de compactação relativo do solo, provavelmente decorrente do tempo de adoção do sistema de semeadura direto praticado nesta área. Assim, após 5 anos da determinação dos valores da DS (método do anel) desta pesquisa, a DS diminuiu de 1,442 para 1,359 kg dm<sup>-3</sup> e de 1,460 para 1,411 kg dm<sup>-3</sup>, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Contudo, ainda se verificou o gradiente da DS em profundidade, com maiores valores na camada de 0,10-0,20 m.

Os valores da densidade do solo determinados pelo método do torrão parafinado foram maiores que os determinados pelo método do anel volumétrico (Quadro 5), corroborando com as constatações de Pires et al. (2011) e as de Gonçalves et al. (2013). As prováveis causas atribuídas como responsáveis pelo aumento dos valores são a possibilidade da penetração de parafina nas pequenas fendas e macroporos no momento da impermeabilização do torrão e também a segregação e a perda de macroporos na coleta do torrão.

Vanremortel & Shields (1993), constataram aumentos da DS de 0,07 a 0,09 kg dm<sup>-3</sup>, quando determinada pelo método do torrão, comparativamente ao método do anel volumétrico. Pires et al. (2011) evidenciaram diferenças significativas entre os métodos, com aumento médio de 0,15 kg dm<sup>-3</sup> dos valores de DS obtidos pelo método do torrão, devido ao procedimento de coleta dos torrões, no qual, somente aqueles mais densos mantiveram estrutura para serem preparados e analisados em laboratório. Gonçalves et al. (2013) também constataram, em média, um aumento de 0,12 kg dm<sup>-3</sup> e concluíram que o método do anel volumétrico é mais sensível que o do torrão para mostrar diferenças entre sistemas de manejo.

Assim, os aumentos evidenciados nesta pesquisa, respectivamente de 0,103 e 0,079 kg dm<sup>-3</sup> nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, confirmam os resultados da literatura supracitados.

Conforme consta no Quadro 5, a porosidade total do solo (PT), independentemente do metodologia utilizada, ficou aquém da preconizada como ideal, de 0,50m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> do volume total do solo, segundo as sugestões de Kiehl (1979), ratificando o relativo estado de compactação do solo nas camadas avaliadas. Entretanto, permaneceu dentro da faixa constatada de valores de PT para os solos argilosos, de 40 a 60% (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Verificou-se que houve redução da PT em relação à determinada no momento da caracterização inicial dos atributos físicos do solo previamente ao experimento (Quadro 2), causada pelo tráfego de máquinas e implementos durante a implantação, condução e colheita da soja.

Os valores de PT oscilaram de 0,398 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (PT7) a 0,441 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (PT1 e PT2). Assim, ficou notório que os menores valores de PT obtidos (PT7, PT8, PT5 e PT6) ocorreram, quando se utilizou no cálculo da PT, os valores da DS oriundos do método do torrão parafinado (DS3 e DS4), e os maiores (PT3 e PT4; PT1 e PT2), quando se utilizou, os valores da DS provenientes do método do anel volumétrico (DS1 e DS2).

## 4.2 Análise de regressão entre os atributos estudados

### 4.2.1 Regressão linear simples

#### 4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples

No Quadro 6 consta a matriz de correlação linear simples entre os componentes de produção da soja (NVP, NGV, MCG, MGP, POP, ALT e PGO) e nos Quadros 7 e 8 a matriz de correlação entre os atributos do solo (DS1, DS2, DS3, DS4, DP1, DP2, DP3, DP4, PT1, PT2, PT3, PT4, PT5, PT6, PT7, PT8) e os componentes de produção da soja, respectivamente nas camadas superficial e subsuperficial do solo.

#### 4.2.1.1.1 COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA *VERSUS* COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA

De acordo com o Quadro 6, as correlações significativas entre os componentes de produção da soja foram: PGO x MGP ( $r = 0,254^*$ ), PGO x ALT ( $r = 0,289^{**}$ ), NVP x MGP ( $r = 0,902^{**}$ ), NVP x ALT ( $r = -0,352^{**}$ ), NGV x MCG ( $r = -0,212^*$ ), MGP x POP ( $r = -0,247^*$ ), MGP x ALT ( $r = -0,275^{**}$ ) e POP x ALT ( $r = 0,430^{**}$ ). Dentre as correlações

diretas, destacou-se o par NVP x MGP, com maior coeficiente de correlação, portanto, de elevado interesse agrícola, indicando que na medida em que houve aumento do número de vagens por planta (NVP) elevou-se a massa de grãos por planta, concordando com os resultados de Dalchiavon et al. (2011), que evidenciaram um elevado coeficiente de correlação ( $r = 0,838^{**}$ ) para o referido par. A correlação direta verificada entre a POP x ALT ( $r = 0,430^{**}$ ), corrobora com as indicações de Aratani (2003), que evidenciou que o aumento da população de plantas acarreta em maior altura de plantas, decorrente da competição, principalmente por luz, que se estabelece entre as mesmas. Houve correlação direta entre a PGO x ALT ( $r = 0,289^{**}$ ), que também foi verificada por Reichert et al. (2008), que obtiveram um coeficiente de correlação linear significativo a 1% de probabilidade ( $r = 0,550^{**}$ ) para o referido par, evidenciando que as plantas mais altas foram mais produtivas.

**Quadro 6:** Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja produzida num Latossolo Vermelho Distroférico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS)

Atributos (a)	Coeficiente de correlação (b)					
	PGO	NVP	NGV	MCG	MGP	POP
NVP	-0,121					
NGV	-0,080	-0,128				
MCG	0,189	0,023	<b>-0,212*</b>			
MGP	<b>0,254*</b>	<b>0,902**</b>	0,083	-0,030		
POP	-0,123	-0,305	0,030	-0,073	<b>-0,247*</b>	
ALT	<b>0,289**</b>	<b>-0,352**</b>	0,181	-0,099	<b>-0,275**</b>	<b>0,430**</b>

Nota: (a) Vide Quadro 4; (b) \*\* significativo a 1%, \* significativo a 5%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Por outro lado, exceto para as correlações envolvendo a PGO, todas as outras ocorreram de forma inversa, com destaque para o par NVP x ALT ( $r = -0,352^{**}$ ). Lazarini (2001) e Paschoalette (2003) afirmam que um dos fatores que influencia o número de vagens é a população de plantas, ou seja, quando se tem menor população por área, normalmente tem-se menor altura e maior quantidade de ramificações, conseqüentemente, plantas com maior número de vagens. As relações inversas verificadas entre o NGV x MCG ( $r = -0,212^*$ ) e a MGP x POP ( $r = -0,247^*$ ) concordaram com as constatações de Dalchiavon e Carvalho (2012) que obtiveram correlações indiretas entre o NGV x MMG ( $r = -0,230^*$ ) e a MGP x POP ( $r = -0,545^{**}$ ), pesquisando a correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria-MS.

#### 4.2.1.1.2 COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA *VERSUS* ATRIBUTOS DO SOLO

Houve correlação entre os componentes de produção da soja e os atributos físicos do solo em ambas as camadas do solo (Quadro 7 e 8). Diversas correlações foram significativas, tanto direta, quanto indiretamente entre eles. Destaca-se a correlação direta entre a PGO x DS1 ( $r = 0,268^{**}$ ) e PGO x DS2 ( $r = 0,239^*$ ) e a correlação indireta entre os pares PGO x PT1 ( $r = -0,253^*$ ), PGO x PT3 ( $r = -0,288^{**}$ ) e PGO x PT2 ( $r = -0,270^{**}$ ).

A correlação direta entre a PGO e a DS em ambas as camadas indicou que a medida que o solo se compactou houve aumento da PGO. De acordo com Reichert et al. (2003) o aumento da DS, frequentemente verificado em lavouras sob semeadura direta, nem sempre é prejudicial à produtividade, devido a maior continuidade dos poros e seus efeitos na aeração do solo e na penetração das raízes. Contudo, os resultados discordaram dos verificados por Santos et al. (2006), Lima et al. (2007) e Rosa Filho (2008), os quais, respectivamente avaliaram a produtividade de grãos de milho (Latosolo Vermelho Distroférico de Selvíria, MS), a de massa seca de forragem do milho safrinha (Latosolo Vermelho Distroférico de Pereira Barreto, SP) e a produtividade da soja (Latosolo Vermelho Distroférico de Selvíria, MS) e constataram correlações inversas e significativas com a DS, respectivamente de  $-0,212^*$ ,  $-0,143^*$  e  $-0,213^*$ .

Por outro lado, Dalchiavon (2012) avaliando a cana-de-açúcar em dois métodos de colheita (com e sem palhada) e em função de atributos físico-químicos do solo, verificou correlações diretas e significativas ( $r = 0,305^{**}$  e  $r = 0,211^*$ , respectivamente) da DS com a produtividade da cultura num Argissolo Vermelho Eutrófico em ambos os sistemas de colheita, corroborando os resultados desta pesquisa.

Por outro lado, as correlações indiretas entre os pares PGO x PT1, PGO x PT3 e PGO x PT2 indicaram que com aumento da PT houve redução da PGO, discordando de Lima et al. (2007), que atestaram correlação direta e significativa ( $r = 0,199^{**}$ ) entre a produtividade de massa seca da forragem do milho e a PT de um Latossolo Vermelho Distrófico em Pereira Barreto (SP). Entretanto, os resultados concordaram com os de Megda et al. (2008) que constataram correlação inversa e significativa ( $r = -0,209^*$ ) entre a produtividade de feijão e a PT de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Tanto Dalchiavon (2012) quanto Megda et al. (2008) explicaram seus resultados com base no efeito do contato solo-raiz. Enquanto que nesse último atribuiu-se insuficiente contato solo-raiz, no primeiro, o aumento na DS poderia ter beneficiado o contato solo-raiz, com provável melhoria na absorção de nutrientes da solução do solo.

**Quadro 7:** Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja e de um Latossolo Vermelho Distroférico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS), na profundidade de 0,00-0,10 m

Atributos <sup>(a)</sup>	Coeficiente de correlação <sup>(b)</sup>													
	PGO	NVP	NGV	MCG	MGP	POP	ALT	DS1	DS3	DP1	DP3	PT1	PT3	PT5
DS1	<b>0,268**</b>	<b>0,229*</b>	-0,077	-0,100	<b>0,228*</b>	-0,169	-0,125	-	-	-	-	-	-	-
DS3	0,014	<b>0,287**</b>	-0,111	0,060	<b>0,252*</b>	<b>-0,199*</b>	<b>-0,272**</b>	<b>0,421**</b>	-	-	-	-	-	-
DP1	0,076	<b>-0,219*</b>	0,135	-0,043	-0,151	<b>0,370**</b>	<b>0,263**</b>	<b>-0,325**</b>	<b>-0,272**</b>	-	-	-	-	-
DP3	0,174	<b>-0,208*</b>	0,030	0,049	<b>-0,239*</b>	<b>0,280**</b>	<b>0,296**</b>	<b>-0,230*</b>	<b>-0,204*</b>	0,121	-	-	-	-
PT1	<b>-0,253*</b>	<b>-0,266**</b>	0,114	0,062	<b>-0,241*</b>	<b>0,270**</b>	0,194	<b>-0,940**</b>	<b>-0,439**</b>	<b>0,627**</b>	<b>0,231*</b>	-	-	-
PT3	<b>-0,288**</b>	<b>-0,263**</b>	0,073	0,103	<b>-0,274**</b>	<b>0,239*</b>	<b>0,206*</b>	<b>-0,952**</b>	<b>-0,431**</b>	<b>0,322**</b>	<b>0,518**</b>	<b>0,898**</b>	-	-
PT5	0,022	<b>-0,324**</b>	0,154	-0,068	<b>-0,260**</b>	<b>0,329**</b>	<b>0,331**</b>	<b>-0,471**</b>	<b>-0,880**</b>	<b>0,695**</b>	<b>0,210*</b>	<b>0,634**</b>	<b>0,477**</b>	-
PT7	0,064	<b>-0,323**</b>	0,100	-0,024	<b>-0,309**</b>	<b>0,286**</b>	<b>0,354**</b>	<b>-0,444**</b>	<b>-0,900**</b>	<b>0,273**</b>	<b>0,609**</b>	<b>0,458**</b>	<b>0,580**</b>	<b>0,806**</b>

Nota: <sup>(a)</sup> Vide Quadro 5; <sup>(b)</sup> \*\* significativo a 1%, \* significativo a 5%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

**Quadro 8:** Matriz de correlação linear dos componentes de produção da soja e de um Latossolo Vermelho Distroférico da Fazenda de Ensino e Pesquisa/UNESP (Selvíria, MS), na profundidade de 0,10-0,20 m

Atributos <sup>(a)</sup>	Coeficiente de correlação <sup>(b)</sup>													
	PGO	NVP	NGV	MCG	MGP	POP	ALT	DS2	DS4	DP2	DP4	PT2	PT4	PT6
<b>DS2</b>	<b>0,239*</b>	<b>0,325**</b>	-0,013	-0,047	<b>0,328**</b>	<b>-0,246*</b>	-0,136	-	-	-	-	-	-	-
<b>DS4</b>	0,025	<b>0,279**</b>	-0,052	0,041	<b>0,249*</b>	-0,102	-0,048	<b>0,519**</b>	-	-	-	-	-	-
<b>DP2</b>	0,079	<b>-0,277**</b>	0,041	-0,148	<b>-0,236*</b>	<b>0,293**</b>	<b>0,300**</b>	-0,098	0,094	-	-	-	-	-
<b>DP4</b>	0,028	-0,196	-0,040	0,042	<b>-0,207*</b>	<b>0,365**</b>	<b>0,292**</b>	<b>-0,296**</b>	<b>-0,213**</b>	<b>0,306**</b>	-	-	-	-
<b>PT2</b>	<b>-0,270**</b>	<b>-0,399**</b>	0,030	-0,027	<b>-0,383**</b>	<b>0,339**</b>	<b>0,251*</b>	<b>-0,891**</b>	<b>-0,392**</b>	<b>0,539**</b>	<b>0,387**</b>	-	-	-
<b>PT4</b>	0,187	<b>-0,340**</b>	-0,004	0,052	<b>-0,346**</b>	<b>0,334**</b>	<b>0,217*</b>	<b>-0,944**</b>	<b>-0,512**</b>	0,188	<b>0,595**</b>	<b>0,883**</b>	-	-
<b>PT6</b>	0,047	<b>-0,390**</b>	0,041	-0,089	<b>-0,348**</b>	<b>0,219*</b>	0,176	<b>-0,474**</b>	<b>-0,798**</b>	<b>0,401**</b>	<b>0,321**</b>	<b>0,581**</b>	<b>0,511**</b>	-
<b>PT8</b>	-0,009	<b>-0,307**</b>	0,023	-0,017	<b>-0,288**</b>	<b>0,230*</b>	0,155	<b>-0,547**</b>	<b>-0,921**</b>	0,039	<b>0,576**</b>	<b>0,476**</b>	<b>0,661**</b>	<b>0,803**</b>

Nota: <sup>(a)</sup> Vide Quadro 5; <sup>(b)</sup> \*\* significativo a 1%, \* significativo a 5%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Conforme consta nos Quadros 7 e 8, a metodologia utilizada na determinação dos atributos físicos do solo influenciou os resultados dos testes de correlação linear, envolvendo os componentes de produção da soja e os atributos físicos do solo (planta *versus* solo). Assim, as correlações entre a PGO e a densidade do solo determinada pelo método do torrão parafinado, em ambas as camadas de solo (PGO x DS3 e PGO x DS4), não foram significativas, bem como não foram significativas as correlações entre a PGO e a porosidade total do solo (PGO x PT5, PGO x PT6, PGO x PT7 e PGO x PT8), quando se utilizaram os valores de densidade do solo oriundos do método do torrão parafinado para o cálculo da PT.

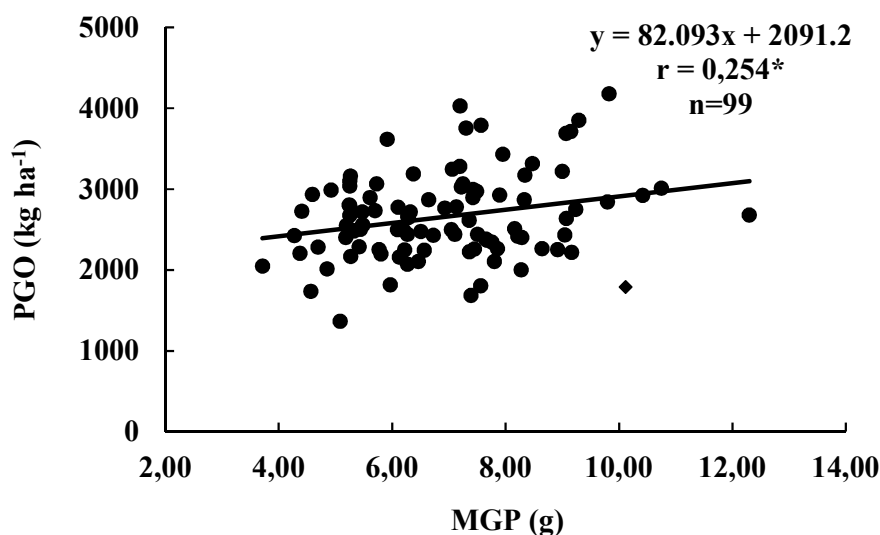
Portanto, diferentemente do método do anel volumétrico, o método do torrão parafinado não foi sensível para discriminar as correlações lineares entre a PGO e a densidade do solo, revelando-se, nas condições desta pesquisa, inadequado para análises de correlação planta *versus* solo.

#### 4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos estudados

As regressões lineares simples entre os atributos, no âmbito das correlações estabelecidas entre a planta *versus* planta e planta *versus* solo constam nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7. Os modelos apresentados foram somente para os pares de atributos que proporcionaram tanto correlações lineares significativas, e, posteriormente também evidenciaram correlações espaciais para tais pares.

No âmbito da correlação entre os componentes de produção da soja e a produtividade da soja (planta *versus* planta), houve relação direta de causa e efeito entre PGO em função da MGP (Figura 3). A correlação entre PGO em função da MGP [PGO = f (MGP)], foi ajustada ao modelo linear, com coeficiente de correlação de 0,254\*, significativo a 5% de probabilidade, indicando que a variabilidade da PGO pode ser explicada por 25,4 % da variabilidade dos dados da MGP. Assim, pela aplicação da equação contida na Figura 3, quando a MGP variar entre 4,0 a 10,0 g, a PGO aumentará de 2419 a 2912 kg ha<sup>-1</sup>. Dessa forma, a partir do valor médio de 6,9 g da MGP estimou-se a PGO média de 2659 kg ha<sup>-1</sup>.

**Figura 3** - Equação de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e a massa de grãos por planta da soja num Latossolo Vermelho Distroférico



Fonte: Dados da pesquisa do autor

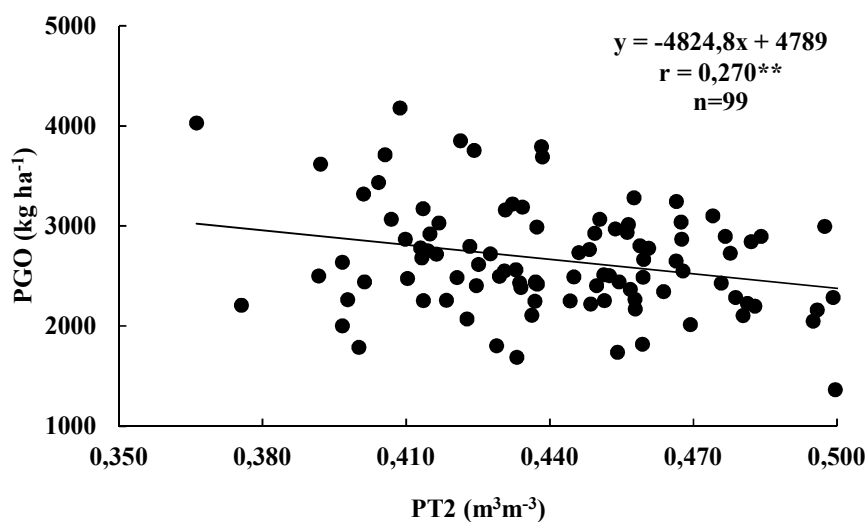
Corroboram com os resultados as constatações de Dalchiavon e Carvalho (2012), que verificaram correlação direta através da análise de regressão entre a produção de grãos obtida da soja (PGO) em função da massa de grãos por planta (MGP), com ajuste potencial e coeficiente de correlação de 0,652\*\*, significativo a 1% de probabilidade. Concluíram que a MGP foi um satisfatório componente de produção para estimar a PGO da soja. Lovera (2015) constatou correlação direta entre a produção de grãos da soja em função do número de grãos por planta, com ajuste linear e coeficiente de correlação de 0,238\*, na mesma área de estudo desta pesquisa, corroborando com os resultados obtidos.

As correlações entre componentes de produção da soja *versus* atributos do solo (planta *versus* solo) constam nas Figuras 4 e 5. As correlações com relações indiretas entre causa e efeito foram a  $PGO = f(PT2)$  (Figura 4a) e a  $PGO = f(PT3)$  (Figura 4b), com modelos de ajuste linear e exponencial e coeficientes de correlação respectivamente de -0,270\*\* e -0,288\*\*, ambos significativos a 1% de probabilidade. Por conseguinte, a variabilidade da PGO pode ser explicada por 27% da variabilidade dos dados da PT2 e por 28,8 % da variabilidade dos dados da PT3 e que o aumento da PT2 e da PT3 resultou em decréscimo da PGO. Assim, pela aplicação das equações das Figuras 4a e 4b, quando a PT2 variar de 0,39 a 0,50  $m^3 m^{-3}$ , a PGO diminuirá de 2907 a 2377  $kg ha^{-1}$ ; e quando a PT3 variar de 0,39 a 0,55  $m^3 m^{-3}$ , a PGO diminuirá de 2770 a 2268  $kg ha^{-1}$ .

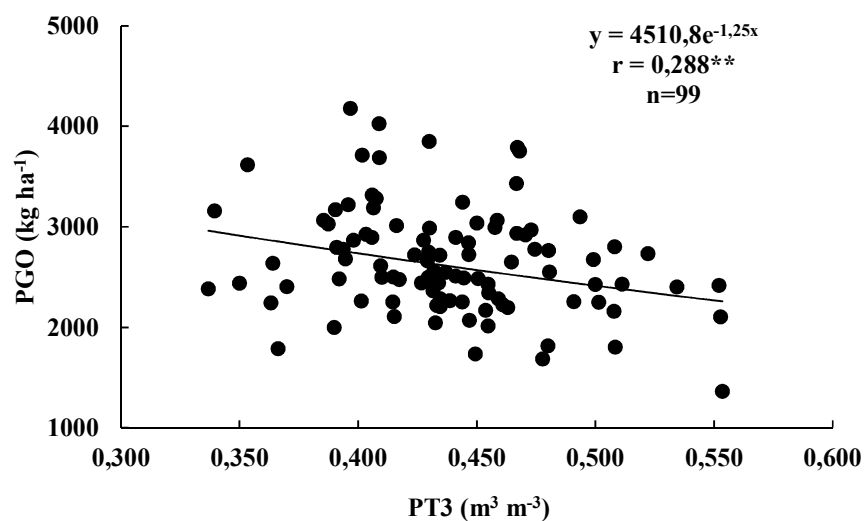
Os resultados concordaram com os de Megda et al. (2008), que constataram correlação linear inversa entre a produtividade do feijoeiro irrigado e a porosidade total do solo ( $r = -0,209^*$ ) na camada de 0,20-0,30 m de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selviria-MS, e concluíram que a porosidade total do solo foi um dos atributos físicos do solo que proporcionaram correlação linear com a produtividade de grãos da cultura.

**Figura 4** - Equações de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e atributos (PT2, PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



b)

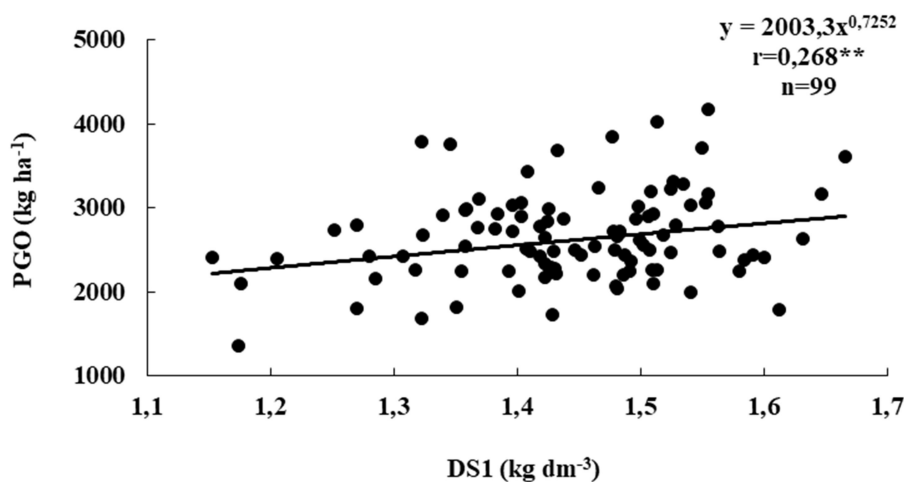


Fonte: Dados da pesquisa do autor

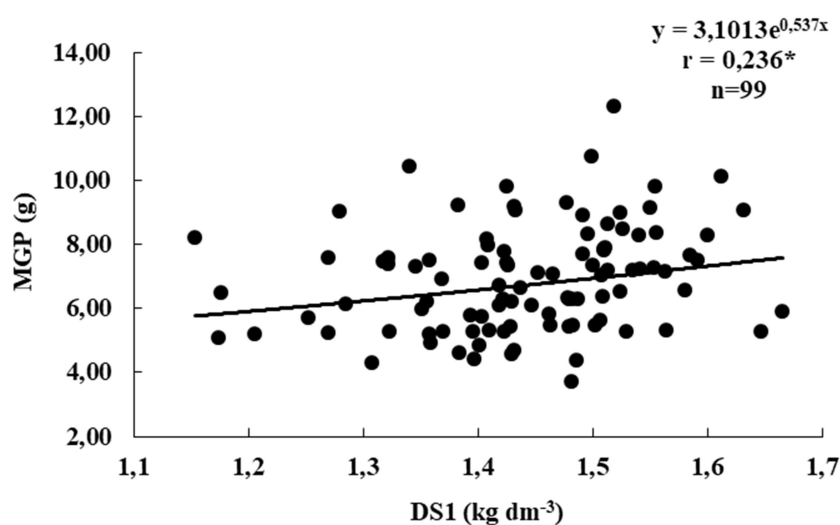
Por outro lado, houve correlações diretas entre a PGO = f(DS1) (Figura 5a) e a MGP = f(DS1) (Figura 5b), que se ajustaram aos modelos potencial e exponencial com coeficientes de correlação de 0,268\*\* e 0,236\*, significativos, respectivamente a 1 e a 5% de probabilidade. Assim, a variabilidade da PGO pode ser explicada por 26,8% da variabilidade dos dados da DS1 e a variabilidade da MGP, por 28,8% da variabilidade dos dados da DS1. Tal constatação revelou que com o aumento da DS1 ocorreu incremento da PGO e da MGP da soja. Portanto, pela aplicação das equações das Figuras 5a e 5b, quando a DS1 variar de 1,3 a 1,6 kg dm<sup>-3</sup>, a PGO aumentará de 2423 a 2817 kg ha<sup>-1</sup>; e a MGP, de 6,2 a 7,3 g.

**Figura 5** - Equações de regressão entre a produtividade de grãos obtida da soja e massa de grãos por planta da soja e a densidade (DS1) de um Latossolo Vermelho Distroférrico

a)



b)



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 4.3 Análise geoestatística

#### 4.3.1 Análise semivariográfica simples

##### 4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos estudados

Nos Quadros 9 e 10 constam, respectivamente, os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os componentes de produção da soja e os ajustados para os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS). Nas Figuras 6 e 7 constam os respectivos semivariogramas.

Dos semivariogramas simples ajustados para os componentes de produção da soja, apenas a PGO e a MGP revelaram dependência espacial (Figuras 6a e 6b), enquanto que, dos semivariogramas simples ajustados para os atributos físicos do solo, apenas DS1, DP3, PT2 e PT3 indicaram dependência espacial (Figuras 7a, 7b, 7c, 7d e 7e, respectivamente). Os demais componentes de produção da soja e atributos físicos do solo revelaram efeito pepita puro, cuja ocorrência indica que são espacialmente independentes e de distribuição aleatória ou que o espaçamento da malha amostral foi maior que o necessário para revelar a dependência espacial (MACHADO et al., 2007).

A análise geoestatística evidenciou semivariogramas com uma série de pontos (lags) bem ajustados à função, tanto para os componentes de produção quanto para os atributos físicos do solo (Quadros 9 e 10). No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente

deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ), foi a seguinte: 1) PT2 (0,962), 2) DP3 (0,923), 3) DS1 (0,890), 4) PT1 (0,843), 5) PT3 (0,840), 6) MGP (0,810) e PGO (0,383).

Assim, destacaram-se os três primeiros, que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial e ajustaram-se ao modelo gaussiano (Quadro 10). Dentre os atributos físicos do solo, a PT2 foi o de melhor ajuste semivariográfico, com maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,962$ ). Corroboram os trabalhos de Santos et al. (2006) e Carvalho et al. (2002) nos quais os dados da porosidade total do solo ajustaram-se ao modelo gaussiano. Por outro lado, nos de Souza et al. (2001), Carvalho et al. (2003) e Megda et al. (2008), os dados se ajustaram aos modelos esféricos, exponencial e exponencial respectivamente.

Em relação ao ADE, o alto valor obtido (63,3%) também foi verificado nos trabalhos de Santos et al. (2006), Rosa Filho (2008) e Megda et al. (2008) com valores, respectivamente de 68,5, 64,7% e 70,8%. Portanto, neste estudo, pode-se constatar que 63,3% da variação total da PT2 foi explicada pela dependência espacial, enquanto que o efeito pepita atribuído ao erro casual foi de 27,7%. (Quadro 10). O alcance, de 526,5 m, foi superior aos determinados nos trabalhos supracitados, que foram, respectivamente de 28,6, 7 e 33,3 m.

Com relação à densidade de partículas, constatou-se que a DP3 ( $r^2 = 0,923$ ) se ajustou ao modelo gaussiano e não variou aleatoriamente em termos espaciais, com ADE de 61,3% (alto) e alcance de 372,4 m, diferentemente de Santos et al. (2006) e Montanari (2009), que constataram efeito pepita puro para o atributo, quando determinado pelo método do balão volumétrico (método padrão).

Por outro lado, a DS1 ( $r^2 = 0,890$ ), ajustou-se ao modelo gaussiano, em consonância com Lima et al. (2007) e Rosa Filho (2008), discordando, entretanto, de Santos et al. (2006) e Queiroz (2009) que constataram ajuste esférico para o referido atributo. Em relação ao ADE, o médio valor verificado (54,7%) também foi constatado por Santos et al. (2006) e Rosa Filho (2008), com ADE de 50,1 e 44,9%. O alcance, de 332,6 m (Quadro 10), foi superior em relação aos obtidos pelos referidos autores, respectivamente de 60,6 e 9,0 m.

Conforme indicado no Quadro 9, constatou-se que a MGP foi o componente de produção da soja de maior coeficiente de determinação espacial ( $r^2 = 0,810$ ), portanto o de melhor ajuste semivariográfico, com ajuste gaussiano, ADE de 73,1% e alcance de 365 m. Dalchiavon e Carvalho (2012) também constataram que a MGP foi o componente de produção da soja de

melhor ajuste semivariográfico ( $r^2 = 0,928$ ), entretanto com ADE de 60,8%, alcance de 114,7 m e com ajuste ao modelo esférico.

A PGO ( $r^2 = 0,383$ ), ajustou-se ao modelo exponencial, em consonância com Dalchiavon e Carvalho (2012), entretanto, discordando de Andreotti et al. (2010), cujo modelo ajustado foi o gaussiano. O ADE médio de 57,3%, foi próximo ao obtido por Santos et al. (2006) e inferior ao de Andreotti et al. (2010), de 74,1% e ao de Dalchiavon e Carvalho (2012), de 88,9%. Contudo, o alcance foi de 237,0 m, superior aos verificados pelos referidos autores, que foram, respectivamente de 41,1, 44,5 e 38,1 m. Assim, os maiores alcances verificados, comparativamente em relação aos observados pelos autores supracitados, ocorreram porque o alcance depende do tamanho da área amostrada e da escala de observação, sendo tanto maior quanto maior for o intervalo entre medidas (TRANGMAR et al., 1985).

Desse modo, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) PT2 (526,5 m), 2) PT1 (460,7 m), 3) PT3 (455,5 m), 4) DP3 (372,4 m), 5) MGP (365,0m), 6) DS1 (332,6 m) e 7) PGO (237,0 m). O valor do alcance pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que determina o número de valores usados na interpolação. Portanto, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando valores de alcance maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004).

**Quadro 9:** Parâmetros dos semivariogramas dos componentes de produção da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros do ajuste										
	Modelo <sup>(b)</sup>	C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub> +C	A <sub>o</sub> (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>		Validação cruzada		
							%	Classe	A	b	R
<b>PGO</b>	exp (398)	9,98.10 <sup>4</sup>	2,34.10 <sup>5</sup>	237,0	0,383	9,06.10 <sup>9</sup>	57,3	ME	-8,6.10	1,032	0,488
<b>NVP</b>	epp	4,3.10	4,3.10	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NGV</b>	epp	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>MCG</b>	epp	1,042	1,042	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>MGP</b>	gau (389)	7,67.10 <sup>-1</sup>	2,85	365,0	0,810	1,25	73,1	AL	5,0.10 <sup>-1</sup>	0,927	0,626
<b>POP</b>	epp	2,20.10	2,20.10	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>ALT</b>	epp	6,70.10	6,70.10	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: <sup>(a)</sup> idem Quadro 4; <sup>(b)</sup> esf = esférico, gau = gaussiano, epp = efeito pepita puro e exp = exponencial; algarismos entre parênteses significando número de pares no primeiro lag; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

Fonte: Dados da pesquisa do autor

**Quadro 10:** Parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros do ajuste										
	Modelo <sup>(b)</sup>	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	A <sub>0</sub> (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>		Validação cruzada		
							%	Classe	A	b	R
DS1	gau (366)	4,35.10 <sup>-3</sup>	9,60.10 <sup>-3</sup>	332,6	0,890	3,96.10 <sup>-6</sup>	54,7	ME	1,90.10 <sup>-1</sup>	0,870	0,476
DS2	Epp	4,00.10 <sup>-3</sup>	4,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
DS3	Epp	5,00.10 <sup>-3</sup>	5,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
DS4	Epp	4,00.10 <sup>-3</sup>	4,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
DP1	Epp	6,00.10 <sup>-3</sup>	6,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
DP2	Epp	4,00.10 <sup>-3</sup>	4,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
DP3	Gau (86)	2,20.10 <sup>-3</sup>	5,69.10 <sup>-3</sup>	372,4	0,923	2,14.10 <sup>-6</sup>	61,3	AL	3,60.10 <sup>-1</sup>	0,859	0,503
DP4	Epp	2,60.10 <sup>-3</sup>	2,60.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
PT1	exp (399)	1,02.10 <sup>-3</sup>	1,55.10 <sup>-3</sup>	460,7	0,843	5,42.10 <sup>-7</sup>	60,4	AL	1,00.10 <sup>-2</sup>	0,977	0,574
PT2	gau (429)	4,15.10 <sup>-4</sup>	1,13.10 <sup>-3</sup>	526,5	0,962	2,37.10 <sup>-8</sup>	63,3	AL	1,00.10 <sup>-2</sup>	0,984	0,598
PT3	gau (473)	1,19.10 <sup>-3</sup>	2,75.10 <sup>-3</sup>	455,5	0,840	5,72.10 <sup>-7</sup>	56,7	ME	5,0.10 <sup>-2</sup>	0,892	0,510
PT4	Epp	8,00.10 <sup>-4</sup>	8,00.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
PT5	Epp	1,00.10 <sup>-3</sup>	1,00.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
PT6	Epp	8,00.10 <sup>-4</sup>	8,00.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
PT7	Epp	1,28.10 <sup>-3</sup>	1,28.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
PT8	Epp	8,00.10 <sup>-4</sup>	8,00.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-

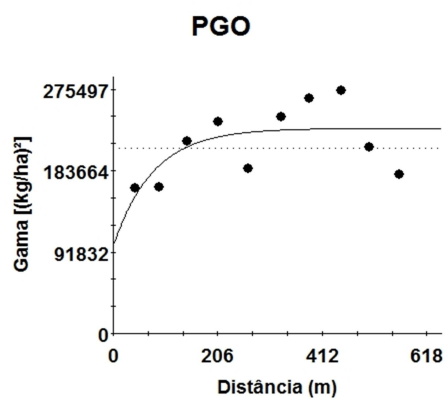
Nota: <sup>(a)</sup> idem Quadro 5; <sup>(b)</sup> gau = gaussiano, epp = efeito pepita puro e exp = exponencial; algarismos entre parênteses significando número de pares no primeiro lag; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

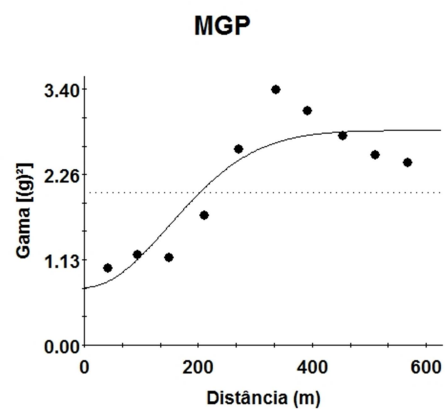
Assim, visando auxiliar trabalhos futuros, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão em geral não deverão ser menores que 237 m, por representar a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si

**Figura 6.** Semivariogramas dos componentes de produção da cultura da soja (PGO, MGP) num Latossolo Vermelho Distroférico

a)



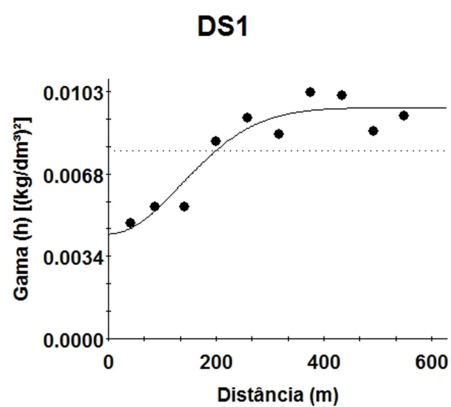
b)



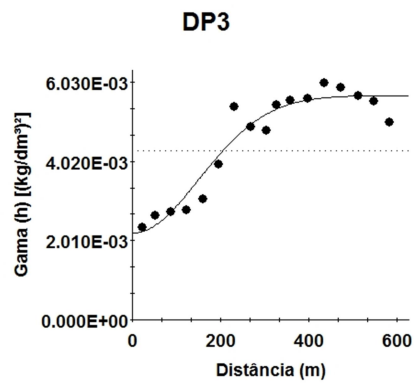
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 7** - Semivariogramas de atributos (DS1, DP3, PT1, PT2 e PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférico

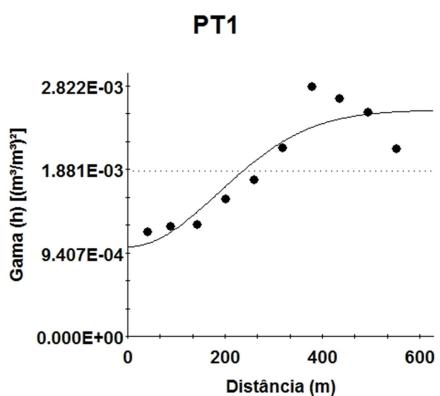
a)



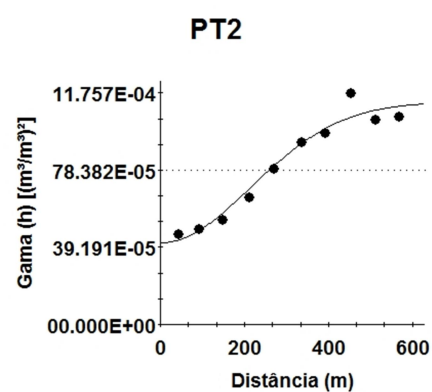
b)



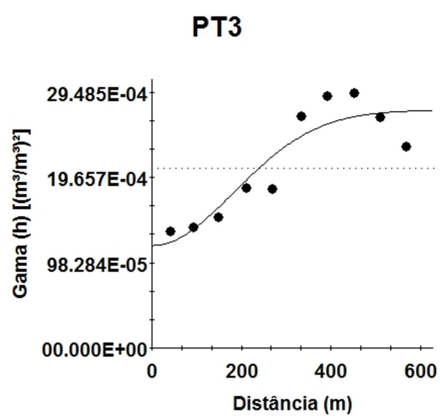
c)



d)



e)



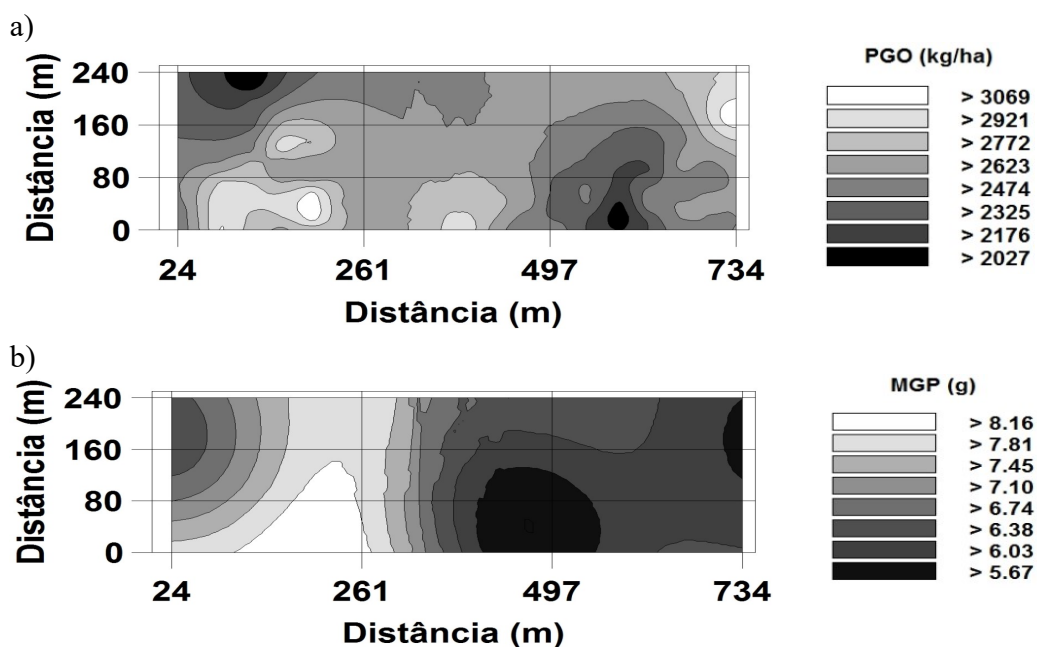
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

#### 4.3.1.2 Mapas de krigagem dos atributos estudados

Nas Figuras 8 e 9 constam, respectivamente, os mapas de krigagem simples dos componentes de produção da soja e os dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Conforme a Figura 8a, a krigagem indicou que nas regiões centro-oeste, sudoeste, centro-sul e nordeste ocorreram os mais elevados valores da PGO (2623 a 3069 kg ha<sup>-1</sup>). Por outro lado, nas regiões noroeste e sudeste do mapa, constataram-se os menores valores da PGO (2027 – 2474 kg ha<sup>-1</sup>). Com relação à MGP, verificou-se que os maiores valores (7,10 – 8,16 g) ocorreram, predominantemente, nas regiões centro-oeste e sudoeste e os menores (5,67 – 6,74 g) nas regiões leste-sudeste do mapa de krigagem (Figura 8b). Assim, a PGO apresentou uma distribuição espacial dos seus valores de forma direta com aqueles da MGP, concordando com Dalchiavon e Carvalho (2012) que constataram correlação direta entre a PGO e a MGP da soja.

Figura 8 - Mapas de krigagem dos componentes de produção da cultura da soja (PGO, MGP) num Latossolo Vermelho Distroférico

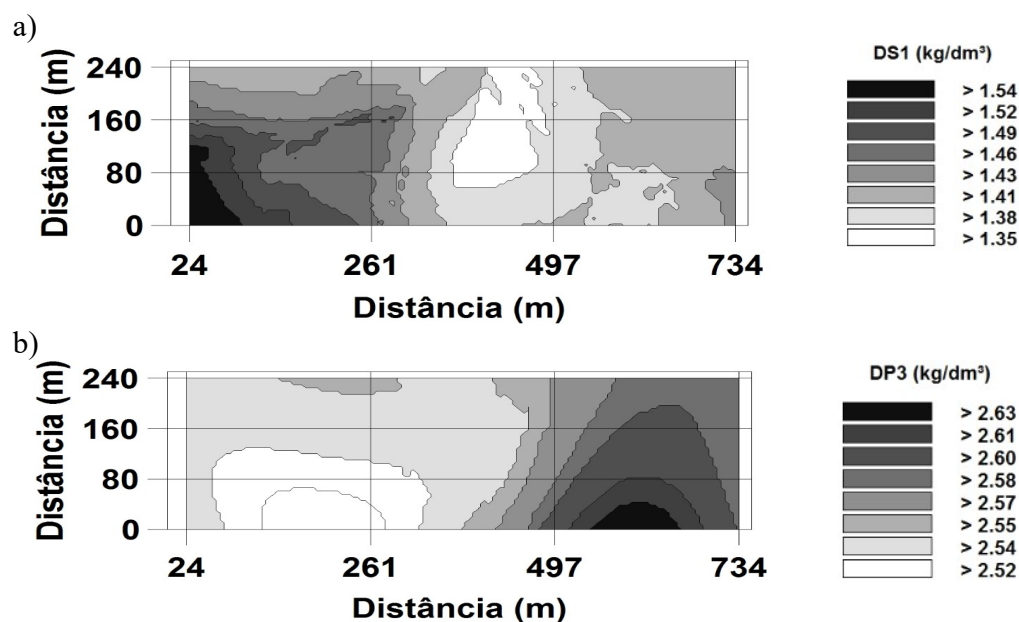


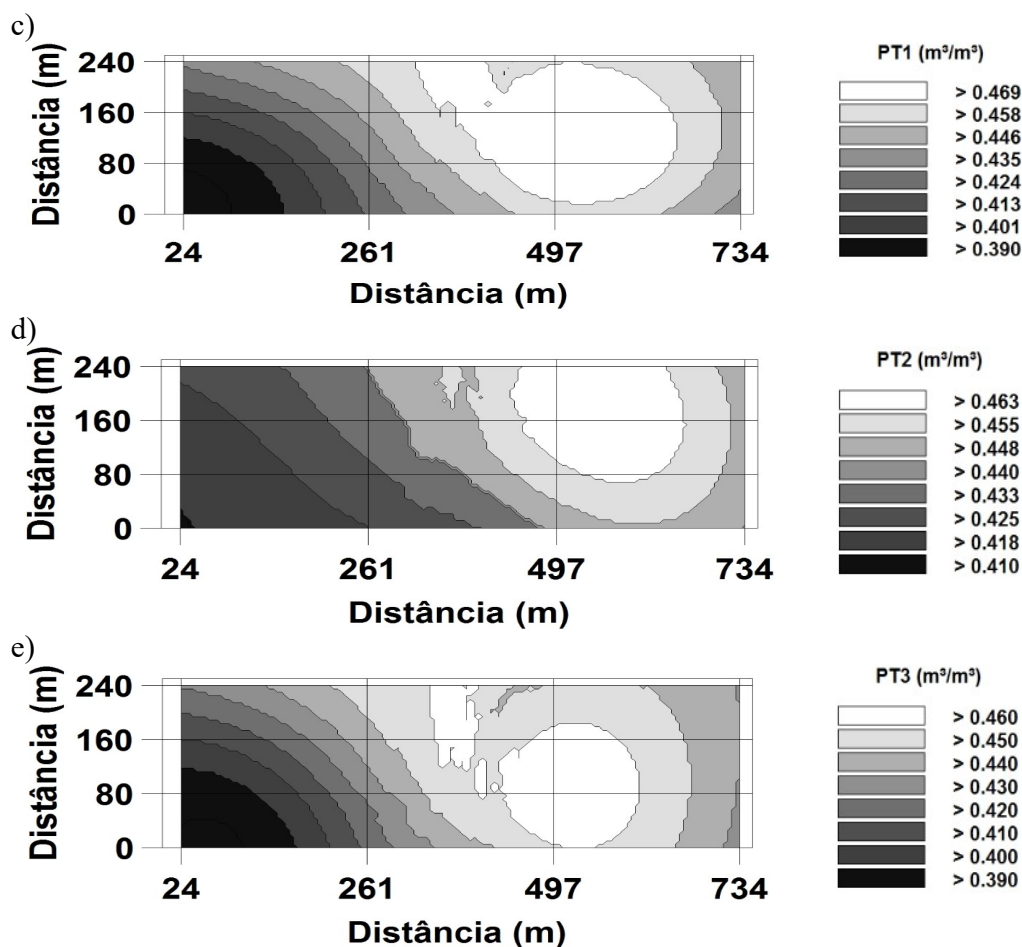
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

De acordo com a Figura 9, nos mapas de krigagem dos atributos físicos do solo observou-se uma inversa e elevada similaridade no comportamento espacial da densidade do solo (Figura 9a) e sua porosidade total (Figuras 9c, 9d e 9e). Constataram-se os maiores valores de DS1 ( $1,46 - 1,54 \text{ kg dm}^{-3}$ ) nas regiões centro-oeste e sudoeste do mapa, nas quais, por outro lado, constataram-se os menores valores de PT1 ( $0,390 - 0,424 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), PT2 ( $0,410 - 0,433 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e PT3 ( $0,390 - 0,420 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), indicando a correlação inversa entre eles. Por conseguinte, nas regiões centro-leste e sudeste, ocorreram os menores valores de DS1 ( $1,35 - 1,43 \text{ kg dm}^{-3}$ ) e os maiores valores de PT1 ( $0,435 - 0,469 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), PT2 ( $0,440 - 0,463 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e PT3 ( $0,430 - 0,460 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

Com relação a DP3 (Figura 9b), a krigagem indicou que nas regiões centro-oeste, centro-sul e sudoeste ocorreram os menores valores ( $2,52 - 2,55 \text{ kg dm}^{-3}$ ), enquanto que, nas regiões centro-leste, nordeste e sudeste, os maiores valores ( $2,57 - 2,63 \text{ kg dm}^{-3}$ ). É interessante ressaltar que a DP3 apresentou uma distribuição espacial dos seus valores de forma direta com aqueles da porosidade total do solo (PT1, PT2 e PT3), confirmando a correlação direta entre si, bem como, a correlação indireta de ambos com a densidade do solo, conforme indicado anteriormente pela análise de correlação linear (Quadros 7 e 8)

**Figura 9** - Mapas de krigagem de atributos (DS1, DP3, PT1, PT2, PT3) de um Latossolo Vermelho Distroférrico





Fonte: Dados da pesquisa do autor.

### 4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

#### 4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem entre os atributos estudados

No Quadro 11 constam os parâmetros dos semivariogramas cruzados, ajustados para os componentes de produção da soja e para os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS).

Com respeito ao desempenho dos semivariogramas cruzados, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ) foi à seguinte: 1) MGP =  $f(\text{DS1})$ ,  $r^2 = 0,786$ ; 2) PGO =  $f(\text{PT3})$ ,  $r^2 = 0,606$ ; 3) PGO =  $f(\text{PT2})$ ,  $r^2 = 0,487$ ; 4) PGO =  $f(\text{DS1})$ ,  $r^2 = 0,363$  e 5) PGO =  $f(\text{MGP})$ ,  $r^2 = 0,304$ . Com relação à avaliação da dependência espacial, foi alta (78,1%), para PGO =  $f(\text{PT3})$ , e muito alta para os demais atributos; 97,9% para PGO =  $f(\text{DS1})$ ; 99,8% para PGO =  $f(\text{PT2})$  e MGP =  $f(\text{DS1})$  e de 100% para PGO =  $f(\text{MGP})$ .

Nas figuras 10-14 constam os semivariogramas cruzados e os mapas de co-krigagem entre os componentes de produção da soja (planta *versus* planta) e entre os componentes de produção da soja e os atributos físicos do solo (planta *versus* solo).

Dentre as co-krigagens diretas atestadas pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ), destacou-se a co-krigagem envolvendo a MGP da soja e a DS1 [MGP = f(DS1)], de maior  $r^2$  e melhor ajuste variográfico, do tipo gaussiano com alcance de 486 m (Quadro 11; Figura 14). O confiável  $r^2$  (0,786), indicou que 78,6% da variabilidade espacial da MGP puderam ser explicados pela variabilidade espacial dos dados da DS1. Assim, constatou-se que nos sítios onde ocorreram os maiores valores da DS1 (1,46 – 1,54 kg dm<sup>-3</sup>), foram mapeados os maiores valores da MGP da soja, compreendidos entre 7,4 – 9,7 g. No entanto, naqueles onde os valores de DS1 diminuíram (1,43 – 1,35 kg dm<sup>-3</sup>) a MGP da soja, cultivar Conquista, com semeadura no último decênio de dezembro, diminuiu, oscilando de 6,7 . – 4,4 g.

Conforme consta no Quadro 11 e na Figura 10, houve co-krigagem direta entre a PGO e a MGP da soja [PGO = f(MGP)], com ajuste gaussiano,  $r^2$  de 0,304 e alcance de 308,3 m. Desse modo, nos sítios do mapa nos quais houve aumento da MGP (7,10 – 8,16 g), observaram-se os maiores valores da PGO, compreendidos entre 2714 – 3483 kg ha<sup>-1</sup>. Todavia, naqueles onde se verificou a diminuição da MGP (6,74 – 5,67 g) houve diminuição dos valores da PGO da soja (2458 – 1689 kg ha<sup>-1</sup>). Dalchiavon e Carvalho (2012) verificaram co-krigagem direta entre a PGO e MGP da soja (cultivar BRS-68 Vencedora), porém, com ajuste esférico,  $r^2$  de 0,784 e alcance de 99,6 m, num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria-MS.

A co-krigagem direta entre a PGO de soja e a DS1 (Quadro 11; Figura 11), de ajuste variográfico esférico,  $r^2$  de 0,363 e alcance de 490 m, indicou que nos sítios nos quais a DS1 revelou maiores valores, compreendidos entre 1,46 – 1,54 kg dm<sup>-3</sup>, a PGO da soja aumentou (2918 – 3828 kg ha<sup>-1</sup>). Por conseguinte, nos de menores valores de DS1 (1,43 – 1,35 kg dm<sup>-3</sup>), mapearam-se os menores valores da PGO ( 2614 – 1704 kg ha<sup>-1</sup>). Corroboram as constatações de Lovera (2015) que, nesta mesma área, verificou a co-krigagem direta entre a produção de grãos de soja e a densidade do solo na camada de 0,10-0,20 m, com ajuste gaussiano,  $r^2$  de 0,813 e alcance de 35 m, ratificando a dependência espacial cruzada direta da densidade do solo com a produtividade da soja nesta área de pesquisa, ao longo do tempo.

Por outro lado, as co-krigagens envolvendo a PGO da soja e a porosidade total do solo (PT3 e PT2) foram de relação indireta e ajustaram-se ao modelo gaussiano, indicando que o aumento

da porosidade do solo resultou na diminuição da PGO da soja. Logo, as co-krigagens da  $PGO = f(PT3)$  [(Quadro 11; Figura 13)] e da  $PGO = f(PT2)$  [(Quadro 11; Figura 12)], evidenciaram que nos sítios onde ocorreu aumento dos valores da PT3 ( $0,430 - 0,460 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e da PT2 ( $0,410 - 0,433 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) houve a redução dos valores da PGO da soja, respectivamente de 2454 para 1670  $\text{kg ha}^{-1}$  e de 2457 para 1683  $\text{kg ha}^{-1}$ . Assim, a co-krigagem entre a  $PGO = f(PT3)$  com  $r^2$  de 0,606 e alcance de 535 m, revelou que 60,6% da variabilidade espacial da PGO foi explicada pela variabilidade espacial dos dados da PT3 e que a  $PGO = f(PT2)$  com  $r^2$  de 0,478 e alcance de 401,8 m, explicou 47,8% da variabilidade espacial da PGO em função da variabilidade dos dados da PT2. Megda et al. (2008) constataram correlação espacial inversa entre a produtividade de grãos do feijoeiro e a porosidade total do solo, na camada de 0,10-0,20 m, de um Latossolo Vermelho Distroférico, atestada pela co-krigagem, de ajuste esférico,  $r^2$  de 0,676 e alcance de 48,3 m. Os autores atribuíram à redução da porosidade como responsável pelo efeito positivo no contato solo-raiz pela aproximação dos agregados do solo, propiciando a passagem de poros de elevado diâmetro para aqueles correspondentes a uma tensão de retenção de água dentro da água disponível.

Nesse contexto, corroboram as constatações de Negro (2003), que verificou redução dos poros de maior tamanho de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com laranja, decorrente do aumento da densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m (área do rodado das máquinas e implementos). Assim, o aumento da umidade retida no potencial referente à capacidade de campo ( $-0,01 \text{ MPa}$ ), foi atestado pelo menor volume drenado de poros com diâmetro equivalente a 30  $\mu\text{m}$ , em relação à camada de 0,20-0,40 m, onde a densidade do solo diminuiu.

**Quadro 11:** Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para alguns componentes de produção da soja e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria (MS)

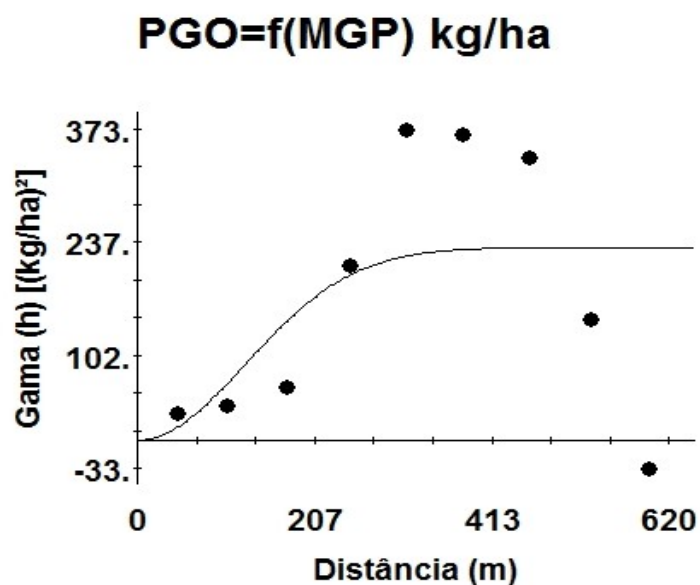
Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros do ajuste										
	Modelo <sup>(b)</sup>	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	A <sub>0</sub> (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
PGO=f(MGP)	gau (406)	1,00.10 <sup>-1</sup>	2,31.10 <sup>2</sup>	308,3	0,304	1,39.10 <sup>5</sup>	100,0	MA	6,60.10 <sup>3</sup>	0,748	0,547
PGO=f(DS1)	esf (297)	2,60.10 <sup>-1</sup>	1,23.10 <sup>1</sup>	490,0	0,363	3,34.10 <sup>2</sup>	97,9	MA	1,01.10 <sup>3</sup>	0,618	0,427
PGO=f(PT2)	gau (574)	1,00.10 <sup>-2</sup>	4,27	401,8	0,478	2,17.10	99,8	MA	6,38.10	0,760	0,552
PGO=f(PT3)	gau (408)	6,40.10 <sup>-1</sup>	-8,92	535,0	0,606	5,00.10	78,1	AL	7,22.10 <sup>2</sup>	0,726	0,516
MGP=f(DS1)	gau(375)	1,00.10 <sup>-4</sup>	1,00.10 <sup>-1</sup>	486,0	0,786	4,29.10 <sup>-3</sup>	99,8	MA	2,72	0,606	0,510

Nota: <sup>(a)</sup> idem Quadros 4 e 5; <sup>(b)</sup> esf = esférico e gau = gaussiano; algarismos entre parênteses significando número de pares no primeiro lag; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

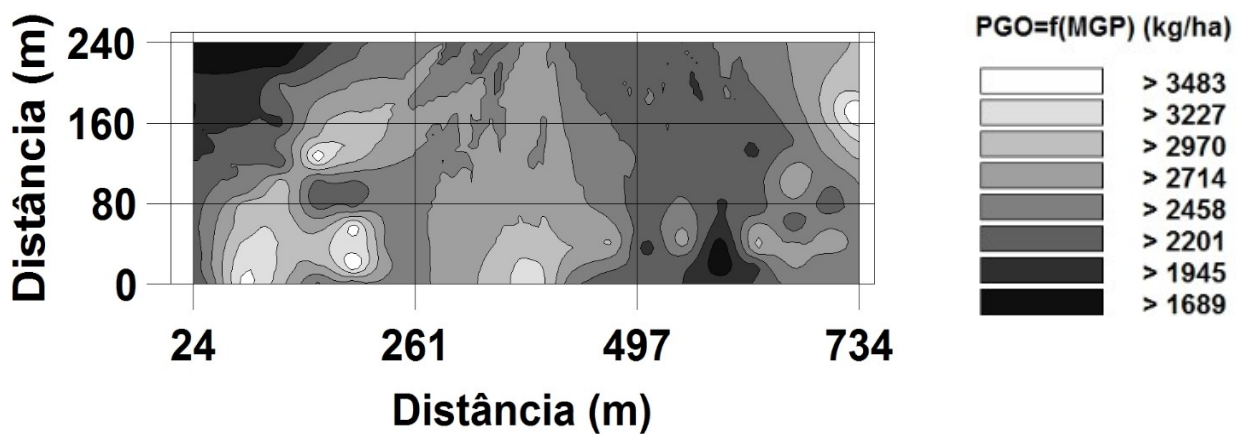
**Fonte:** Dados da pesquisa do autor.

**Figura 10** - Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da massa de grãos por planta da soja de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



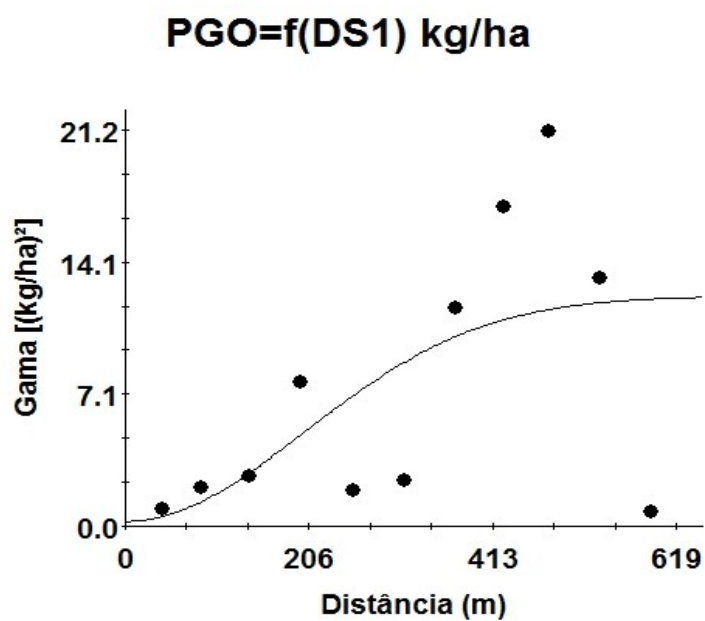
b)



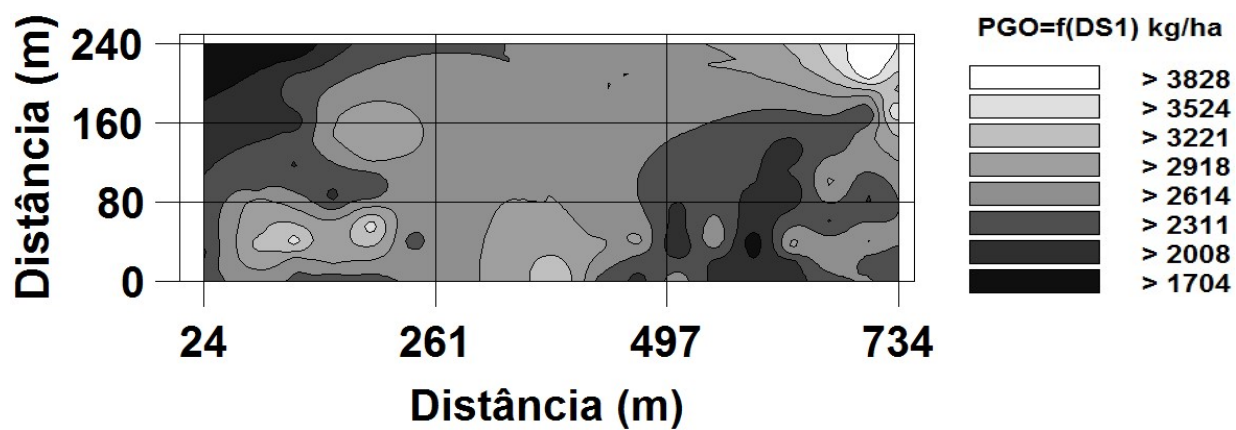
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 11** - Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da DS1 de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



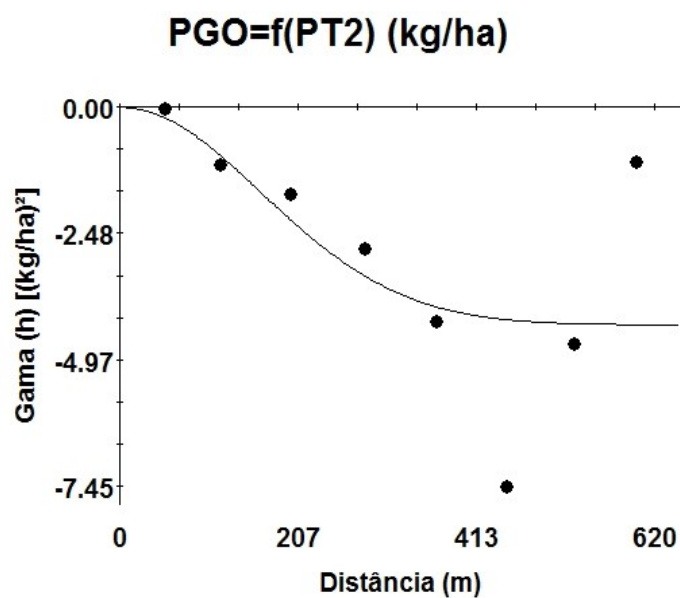
b)



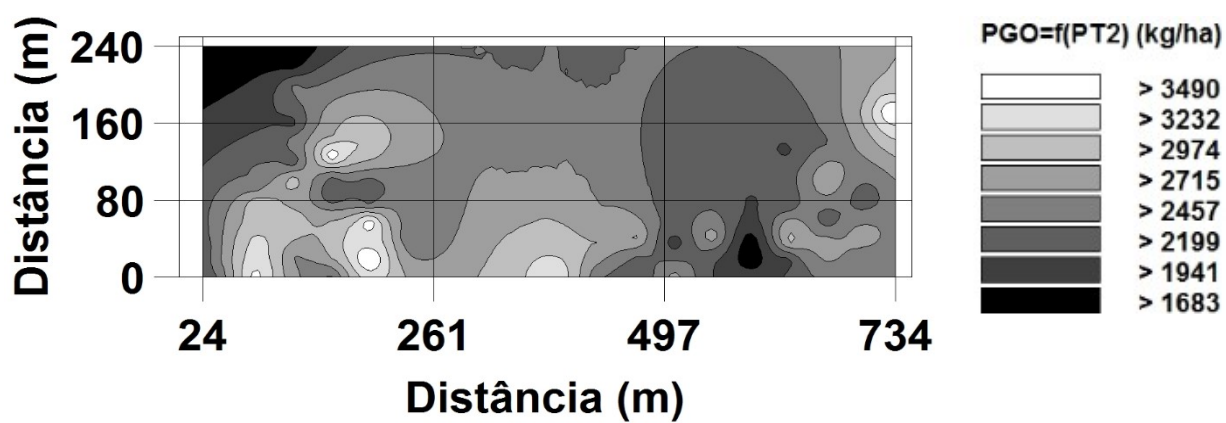
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 12** - Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da PT2 de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



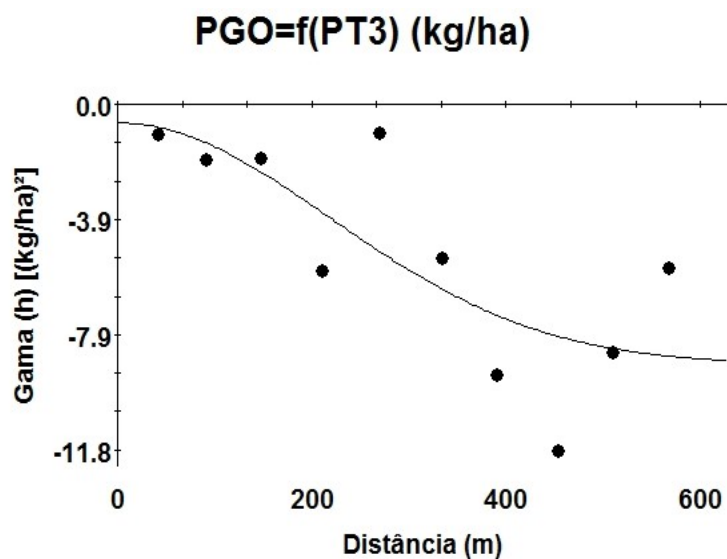
b)



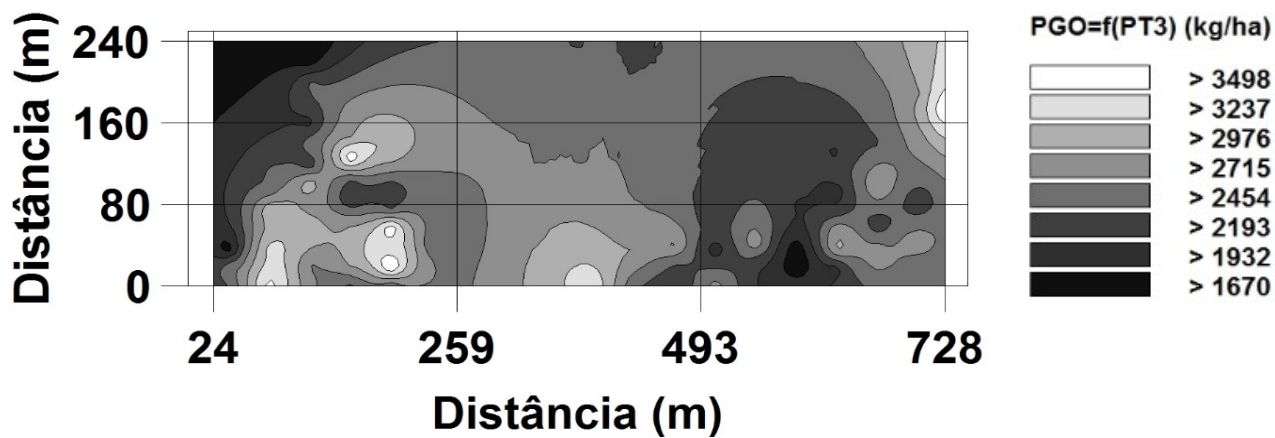
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 13** - Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da produtividade de grãos obtida da soja em função da PT3 de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



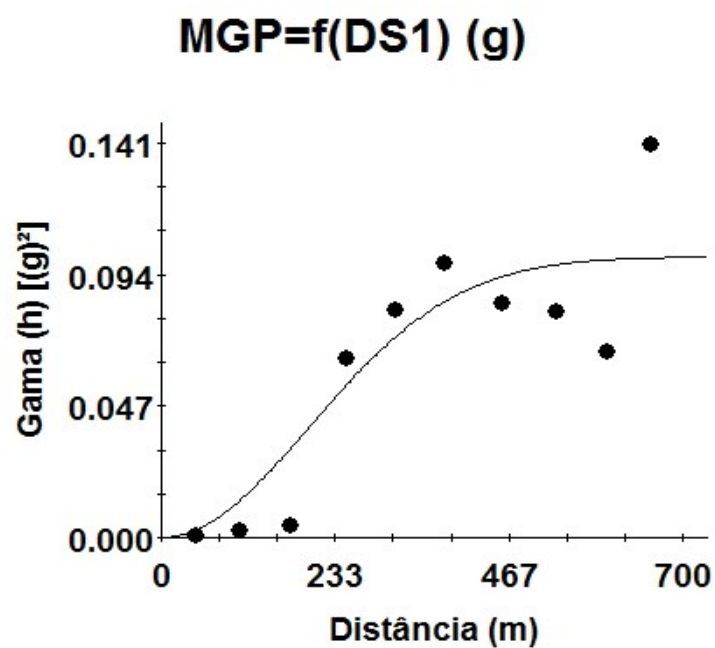
b)



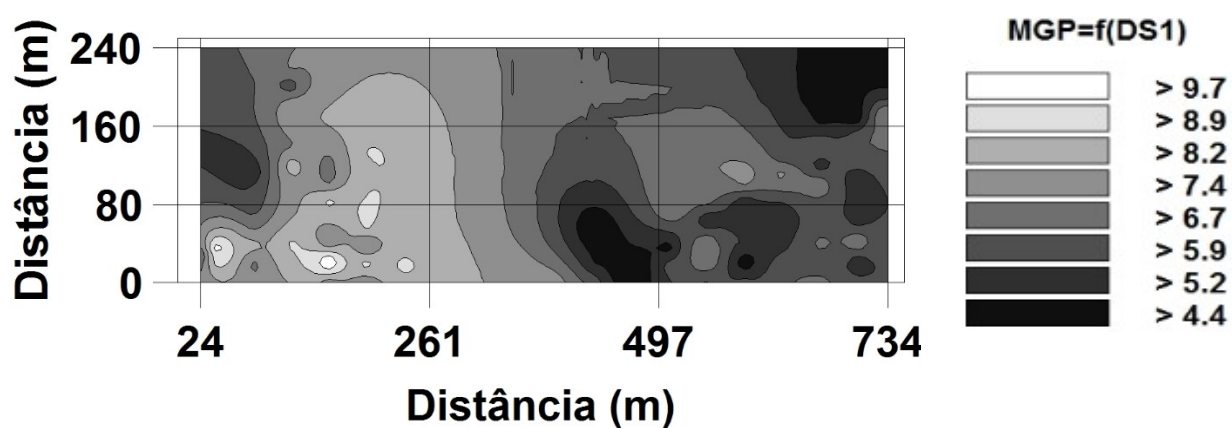
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

**Figura 14** - Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem da massa de grãos por planta da soja em função da DS1 de um Latossolo Vermelho Distroférico

a)



b)



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Portanto, as constatações atestadas pelas co-krigagens diretas [ $MGP = f(DS1)$  e  $PGO = f(DS1)$ ], assim como pelas indiretas [ $PGO = f(PT3)$  e  $PGO = f(PT2)$ ] apontam para o provável benefício da menor porosidade total do solo, nas camadas de 0,00-0,10 m (PT3) e 0,10-0,20 m (PT2), bem como da maior densidade do solo na camada de 0,00-0,10 m (DS1), no sentido de contribuir para o aumento da retenção de água no solo dentro da faixa de água disponível à soja, devido à influência na distribuição do tamanho dos poros. Com efeito, a redução dos poros de maior diâmetro equivalente favoreceu, tanto a retenção de água quanto seu armazenamento por maior tempo no solo, com provável redução do stress hídrico às plantas, causado pelos veranicos, principalmente durante os estádios reprodutivos da soja (APÊNDICE A).

Logo, do ponto de vista edafológico, tais co-krigagens foram de grande importância agrícola porque, a partir dos atributos físicos do solo, DS1, PT2 e PT3, estimou-se, com elevado significado estatístico, a variabilidade espacial da MGP e da PGO da soja, possibilitando o mapeamento das áreas homogêneas com vistas ao manejo da soja de sequeiro (cultivar Conquista), com semeadura direta tardia (último decênio de dezembro), num Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria-MS. Assim, por exemplo, seria plausível a recomendação da semeadura inicialmente nos sítios de menor densidade e maior porosidade total do solo, onde haveria maior risco de stress hídrico antecipado à cultura, e posteriormente, a semeadura nos sítios de maior densidade e menor porosidade total do solo, relativamente menos susceptíveis ao stress hídrico.

## 5 CONCLUSÕES

No geral, os atributos físicos do solo, independentemente da metodologia utilizada, revelaram baixa variabilidade dos dados, com exceção da PT1 e da PT3 (média variabilidade), ao passo que os componentes de produção da soja, baixa (NGV e MCG), média (POP e ALT) e alta variabilidade dos dados (NVP, MGP e PGO).

O método do torrão parafinado superestimou os valores de densidade do solo em ambas as camadas do solo. Em média, os valores determinados foram superiores, respectivamente em 0,103 e 0,079 kg dm<sup>-3</sup> comparativamente aos do método do anel volumétrico, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m.

Do ponto de vista linear, a melhor correlação foi inversa e significativa a 1% de probabilidade ( $r^2 = -0,288^{**}$ ) entre a PGO da soja em função da PT3, calculada com os dados da DS1 (densidade do solo - método do anel) e da DP (densidade de partículas do solo - método do balão volumétrico modificado), na camada de 0,00-0,10 m.

Não houve correlação linear nem espacial nas análises envolvendo a PGO da soja *versus* atributos físicos do solo que usaram valores da densidade do solo do método do torrão parafinado.

Os componentes de produção da soja (MGP e PGO) e os atributos físicos do solo (DS1, PT2 e PT3) não variaram aleatoriamente, pois seguiram padrões espaciais bem definidos, com semivariogramas com alcances entre 237 a 526,5 m, ajustados, predominantemente, ao modelo gaussiano.

Do ponto de vista espacial, houve correlações diretas entre a MGP e a DS1 ( $r^2 = 0,786$ ); a PGO e a DS1 ( $r^2 = 0,363$ ); a PGO e a MGP ( $r^2 = 0,304$ ) e indiretas entre a PGO e a PT3 ( $r^2 = 0,606$ ) e PGO e a PT2 ( $r^2 = 0,478$ ), demonstrando serem os melhores atributos para estimar a produtividade da soja.

As cokrigagens constatadas foram de elevada importância agrícola. A partir da densidade do solo (DS1), da sua porosidade total (PT2 e PT3) e da massa de grãos por planta (MGP) foi possível estimar a variabilidade espacial da PGO da soja, possibilitando mapear a área agrícola, para estabelecer estratégias de manejo, a fim de otimizar a produtividade da soja de sequeiro em solo de textura argilosa no Cerrado.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, 2003. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782003000200015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782003000200015)>. Acesso em: 20 nov. 2008.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 319-326, 1996.
- ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 520-526, 2010. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/cr/v40n3/a499cr1224.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2017.
- ARATANI, R. G. **Culturas de cobertura e épocas de aplicação de nitrogênio para as culturas de milho e soja em plantio direto na região de cerrado**. 2003. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 495-504, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v28n3/a11v28n3.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2017.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 581-8, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, v. 9, p. 181-192, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C; LEONEL, C. L.; CÁSSIA, A. G. S. J.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, 2007. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n6/01.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- BONETTI, L. P. Cultivares e seu melhoramento genético. In: VERNETTI, F. J. (Coord.). **Soja: genética e melhoramento**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. p. 741-94.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Comp.). **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 10. ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1990. 621 p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2279-2288, 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832008000600007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000600007)>. Acesso em: 12 nov. 2017.

CAMARGO, O. A., ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1353-1361, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v27n4/a14v27n4.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.

CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 765-771, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n3/v10n3a33>>. Acesso em: 12 out. 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 4 Safra 2016/17- Nono Levantamento, Brasília – Junho/2017. Brasília, DF, 2017. p.1-161. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_06\\_08\\_09\\_02\\_48\\_boletim\\_graos\\_junho\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_06_08_09_02_48_boletim_graos_junho_2017.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2017.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n2/05.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017.

CURI, N. (Coord.) **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993.

DALCHIAVON, F. C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/8351>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina : Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 541-552, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/10329/WOS000307002600011.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 set. 2017.

DEMATTÊ, J. L. I. **Levantamento detalhado de solos do “Câmpus Experimental de Ilha Solteira”**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1980. 44 p.

DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1979.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa, 1997. 212.p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Tecnologias de produção de soja Região Central do Brasil 2011**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste: ESALQ, 2011. 255 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, n. 14)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA– Embrapa Soja. **Tecnologias de produção de soja Região Central do Brasil 2005**. 2005. Disponível em: <[http://www.cnpso.embrapa.br/download/publicacao/central\\_2005.pdf](http://www.cnpso.embrapa.br/download/publicacao/central_2005.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.

FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T.; DE MARIA, I. C.; FURLANI, A. M. C. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1998. (Boletim técnico, 200).

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHAN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 463-476, 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832008000200001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000200001)>. Acesso em: 20 nov. 2008.

FAVARETTO, N.; COGO, N. P.; BERTOL, O. J. Degradação do solo por erosão e compactação. In: LIMA, M. R. (Ed). **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 255-291.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed). **Methods of soil analyses. Part 4 Physical methods**. Madison: American Society of America, 2002. p. 229-240.

FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial da produtividade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) sob preparo convencional e plantio direto**. 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CARVALHO, G. J. VERONESE JUNIOR, V. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.113-121, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30102.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2017.

GIASSON, E. Introdução ao estudo dos solos. In: MEURER, E. J. (Org.). **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. V. 1, p. 11-30.

GONÇALVES, F. C.; MARASCA, I.; SOUZA, S. F. G.; TAVARES, L. A. F.; SILVA, P. R. A. Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n. 3, p.165-169, 2013. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/energia/article/viewFile/491/844>>. Acesso em: 15 set. 2017.

GOUVÊA FILHO, A. J. **Comportamento de duas variedades de soja submetidas a doses de potássio e épocas de semeadura**. 2003. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/cr/v36n2/a49v36n2.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2017.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Goiânia, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v35n7/1493.pdf>>.

Acesso em: 11 ago. 2017.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v. 25 p. 11-18, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v25n1/02.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-água**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

LAZARINI, E. **Avaliação das características agronômicas e análises nutricionais de genótipos de soja semeados em diferentes épocas em Jaboticabal-SP**. 1995. 197 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1995.

LAZARINI, E. **Comportamento da cultura da soja (Glycine max (L) Merrill) em Selvíria MS: época de semeadura, qualidade fisiológica de sementes e irrigação**. 2001. 130 f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

LOVERA, L, H. **Atributos do solo e componentes produtivos da soja: uma abordagem linear, multivariada e geostatística**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n6/02.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2017.

MACHADO, A. de M. M.; FAVARETTO, N. Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos. In: LIMA, M. R. (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 234-254.

MACHADO, L. O.; LANA A. M. Q.; LANA R. M. Q.; GUIMARÃES E. C.; FERREIRA C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 591-599, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n3/a19v31n3.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2017.

MARINS, A. C. **Métodos de estimação da função semivariância aplicados a dados simulados e reais de produtividade da soja e de atributos físicos de um Latossolo**. 2006. 140 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

MARTINS, M. V. **Aspectos lineares e espaciais da correlação entre a produtividade de feijão (*Phaseolus vulgaris* L) com atributos físicos do solo**. 2007. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MEDINA, P. F. **Produção de sementes de cultivares precoces de soja, em diferentes épocas e locais do Estado de São Paulo**. 1994. 173 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnica) – Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MEGDA, M. M.; CARVALHO, M. P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 781-788, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n2/32.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2017.

MEURER, J. E. II – Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: relação solo-planta**. Viçosa: UFV, 2007. Cap. 4, p. 133-204.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; CORRENTE, J. E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 1, p.35-44, 2003. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2342>>. Acesso em: 15 out. 2017.

MONTANARI, R. **Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico**. 2009. 172 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

NARIMATSU, K. C. P. **Plantio direto de soja sobre *Brachiaria brizantha* no sistema integração agricultura-pecuária**. 2004. 73 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

NEGRO, S. R. L. **Propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com laranja**. 2003. 68 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Estadual Maringá, Maringá, 2003.

OLIVEIRA, J. B.; MONIZ, A. C. Levantamento pedológico detalhado da estação experimental de Ribeirão Preto, SP. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 34, n. 2, p.59-114, 1975.

PASCHOALETTE, W. R. **Modos e épocas de aplicação de calcário na implantação do sistema plantio direto com a cultura da soja**. 2003. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

PIMENTEL-GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PIRES, R. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum**, Maringá, n. 1, v. 33, p. 161-170, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asagr/v33n1/v33n1a23>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 486 p.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981-988, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v38n4/a12v38n4.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2017.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003. Disponível em: <[http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao\\_Artigos/5.pdf](http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/5.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2013.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

QUEIROZ, R. P. **Adubação fosfatada corretiva e gesso no plantio direto de soja e sorgo sobre pastagem degradada na região do cerrado**. 2005. 70 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

QUEIROZ, R. P. **Inter-relação da produtividade da soja com atributos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto no Cerrado**. 2009. 92 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences. Michigan: Gamma Desing Software, 1998. 151 p.

ROSA FILHO, G. **Soja em plantio direto e cultivo mínimo sob diferentes doses de calcário na superfície**. 2005. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ROSA FILHO, G. **Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

SANTOS, P. A.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAS, E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 287-295, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v29n2/24165.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; RAPASSI, L. M. A.; MURAISHI, C. T.; MALLER, A.; MATOS, F. A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* – L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum**, Maringá, n. 3, v. 28, p. 313-321, 2006. Disponível em: <<http://eduem.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/viewFile/939/468>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madion, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, J. R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: entraves e possibilidade no Estado de São Paulo. **Informativo Econômico**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 2, p. 51-57, 2001.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v67n1/a25v67n1.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

SIRTOLI, A. E.; LIMA, M. R.; FERREIRA, F. V. Aquisição e estruturação. In: LIMA, Mde dados geoambientais no contexto de uma unidade de produção agropecuária e suas relações com o diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos. R. (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 10-34.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p.51-58, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v8n1/v8n1a08.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v25n3/19.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary statistical analysis**. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 441 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 81 p.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, p. 229-235, 1991. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAftyYAA/stolf-1991-teoria-teste-experimental-formulas-transformacao-dos-dados-penetrometro-impacto-resistencia-solo-v15n3art01>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, 573-581, 1998. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v22n4/02.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

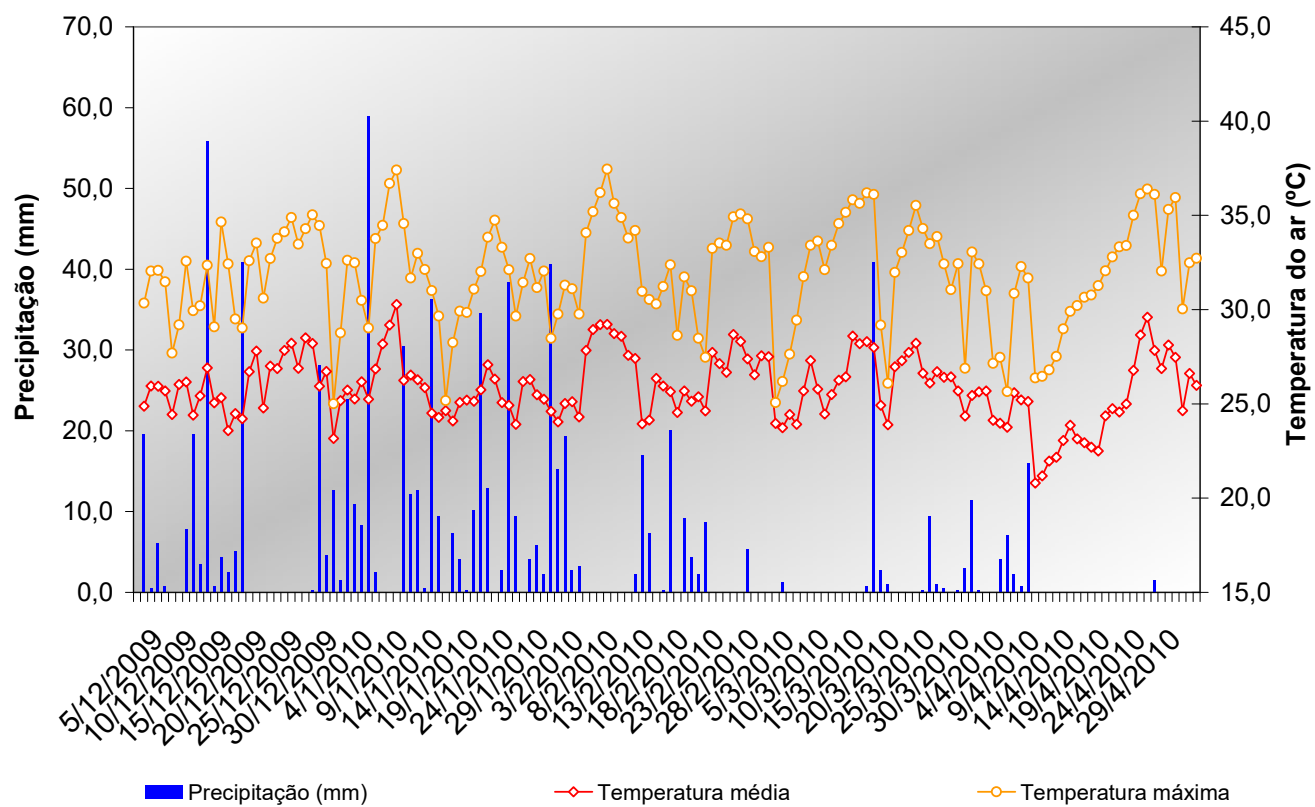
TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

VANREMORTEL, R. D., SHIELDS, D. A. Comparison of clod and core methods for determination of soil bulk-density. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 24, p. 2517-2528, 1993.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

WISNIEWSKI, C. A propriedade agrícola como um sistema. In: LIMA, M. R. (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 2-6.

**APÊNDICE A - Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento.**



**Fonte:** Dados da pesquisa do autor.

**APÊNDICE B** - Aspecto geral do desenvolvimento da cultura (05/03/2010).



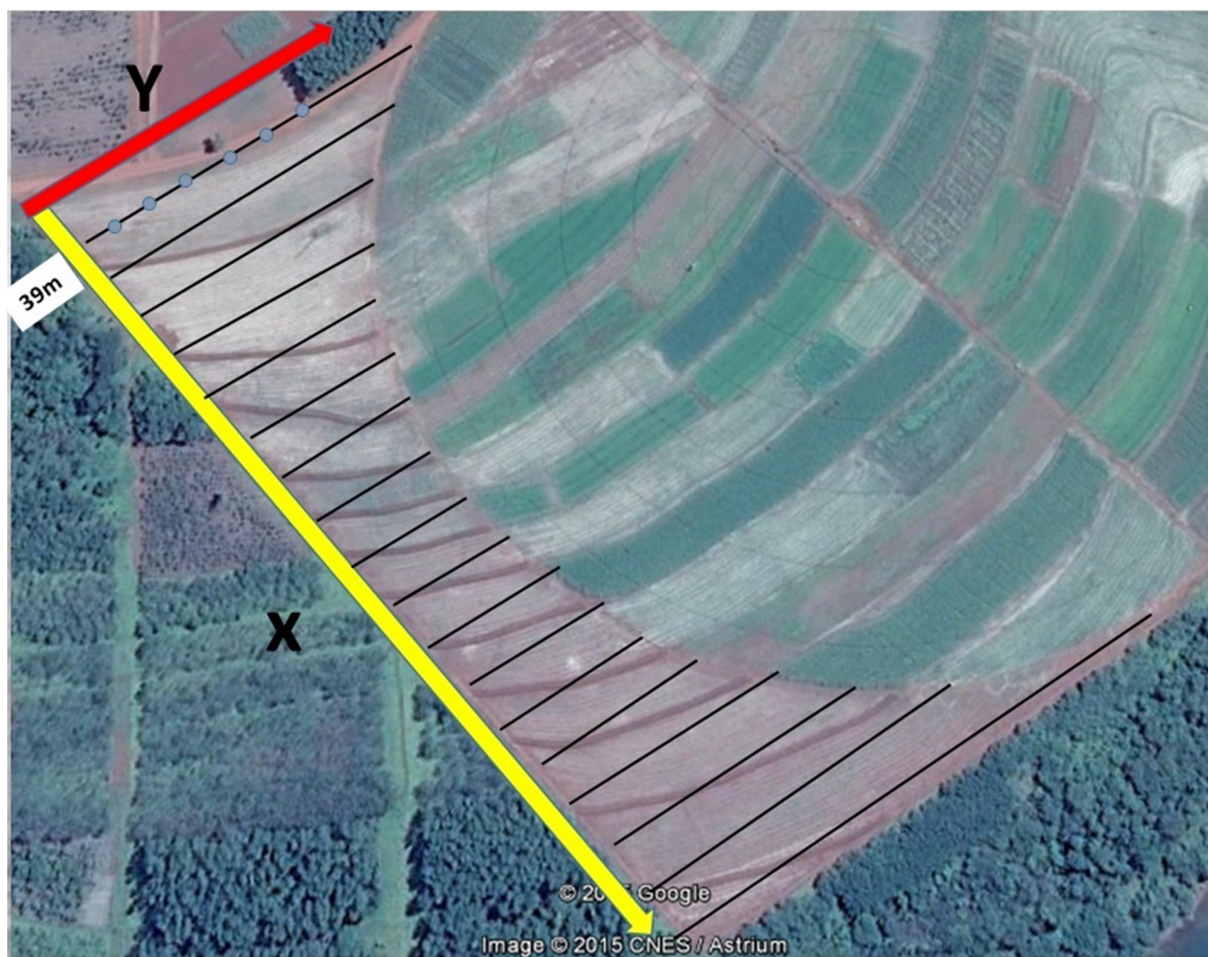
**Fonte:** Arquivo pessoal.

**APÊNDICE C - (a) e (b) Aspecto geral da cultura próximo ao período da colheita (abril/2010), (c) Estaqueamento da malha e (d), (e) e (f) Vista da área após a colheita da soja.**



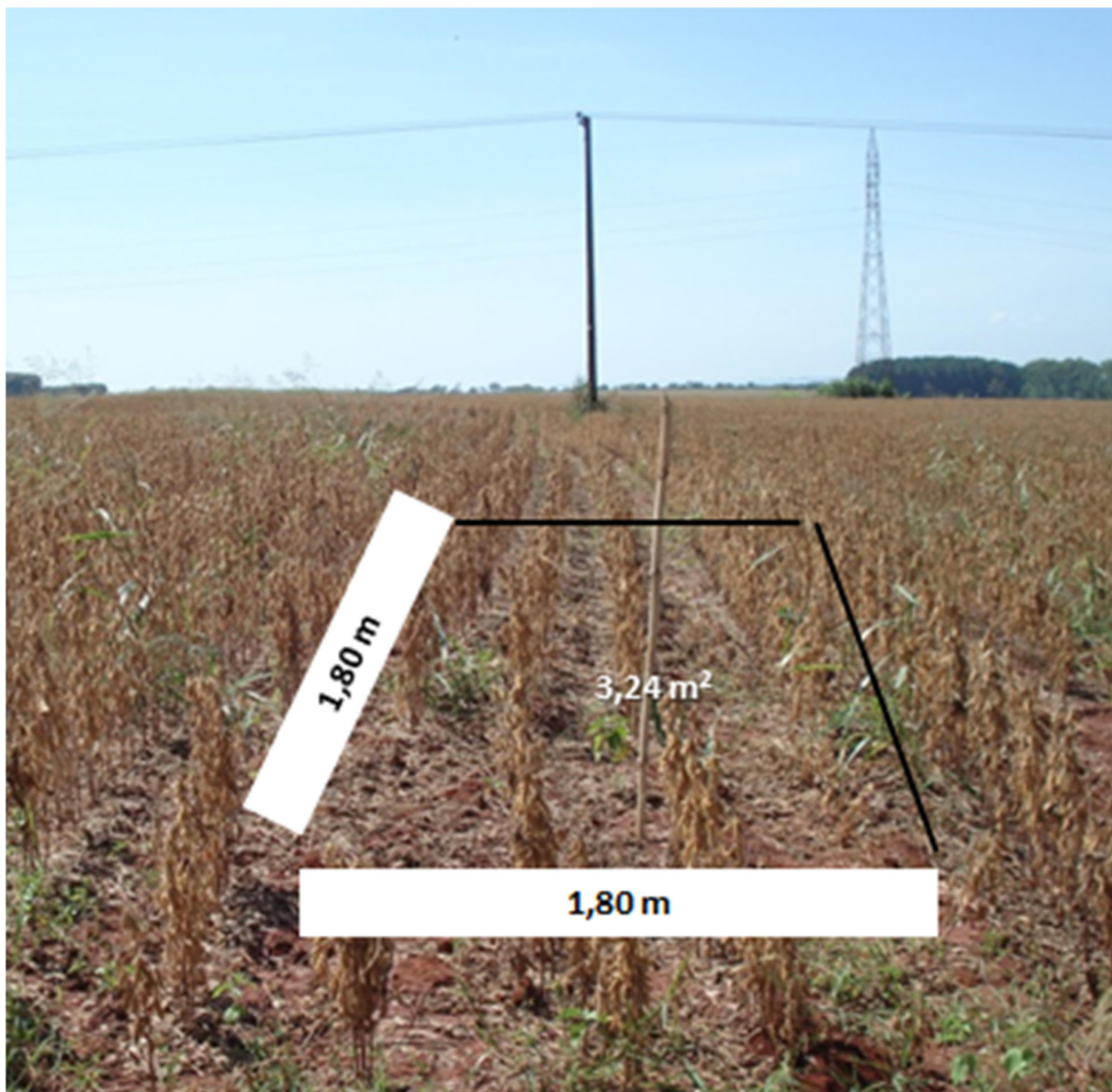
**Fonte:** Arquivo pessoal.

**APÊNDICE D** - Representação esquemática dos eixos x e y para implantação e estaqueamento dos pontos da malha experimental.



Fonte: Arquivo pessoal.

APÊNDICE E - Representação esquemática da área útil ( $3,24 \text{ m}^2$ ).



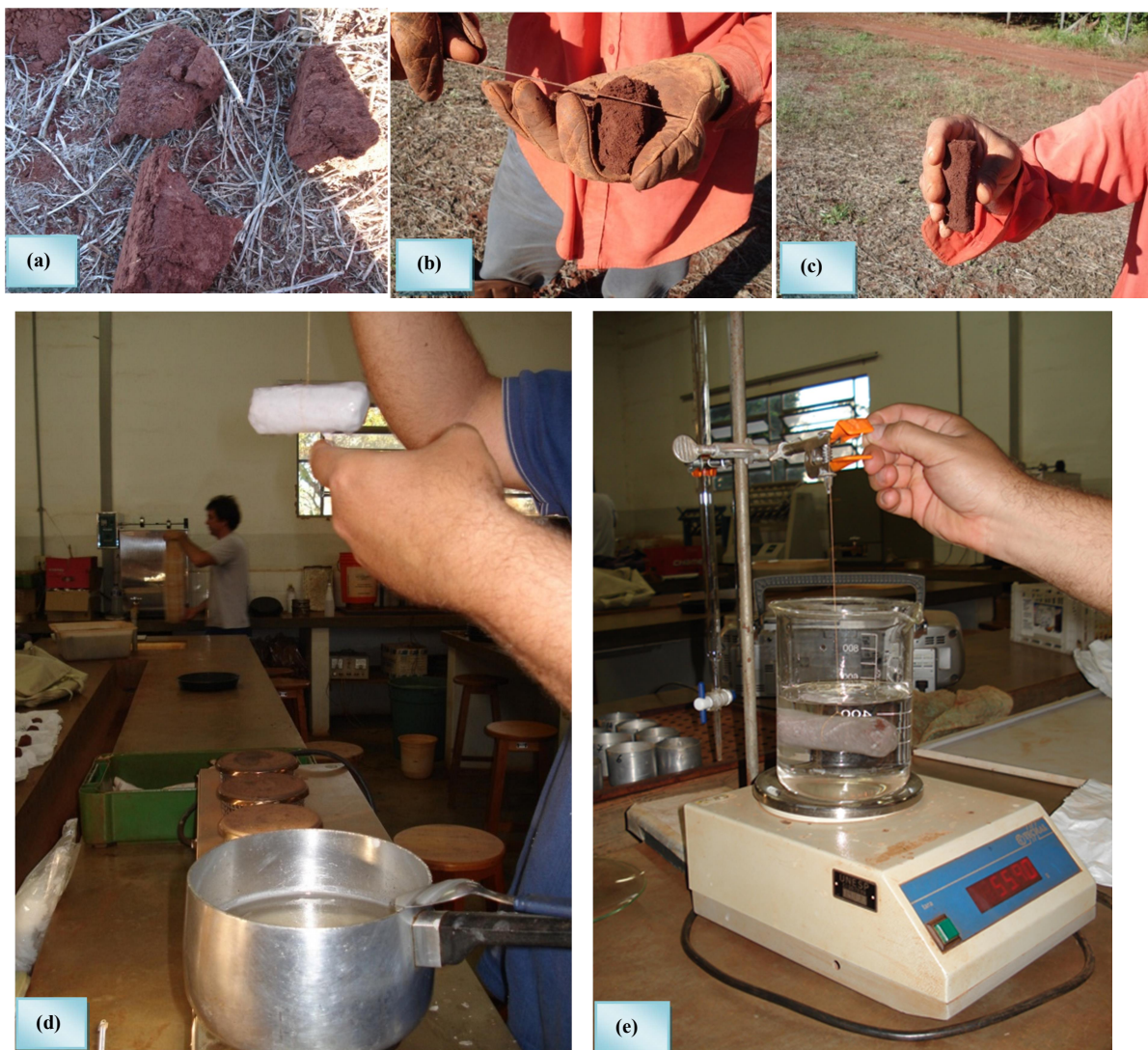
Fonte: Arquivo pessoal.

**APÊNDICE F** - Detalhes das etapas da coleta das amostras para determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico. **(a)** e **(b)** Abertura da trincheira **(c)** e **(d)** Procedimento de extração das amostras indeformadas utilizando o anel volumétrico nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m



Fonte: Arquivo pessoal.

**APÊNDICE G** - Detalhes das etapas de coleta e dos procedimentos de preparo das amostras para determinação da densidade do solo pelo método do torrão parafinado **(a)** “Blocos” do solo dos quais foram retirados os torrões **(b)** e **(c)** Padronização do tamanho dos torrões **(d)** Impermeabilização dos torrões em parafina derretida (60°C) **(e)** Determinação do volume dos torrões para cálculo da densidade do solo.



Fonte: Arquivo pessoal.