

**LUCAS DE SOUZA FERREIRA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO E  
DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO E SUAS  
CORRELAÇÕES COM A DENSIDADE RELATIVA**

**TANGARÁ DA SERRA/MT - BRASIL**

**2015**

**LUCAS DE SOUZA FERREIRA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO E  
DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO E SUAS  
CORRELAÇÕES COM A DENSIDADE RELATIVA**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Ambiente e Sistema de Produção Agrícola para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Souza Maia

Co-orientador: Prof. Dr. Rivanildo Dallacort

**TANGARÁ DA SERRA/MT - BRASIL**

**2015**

Walter Clayton de Oliveira CRB1/2049

Ferreira, Lucas de Souza.  
F3831v Variabilidade espacial dos atributos físicos-hídricos do solo e da produtividade das culturas de soja e milho e suas correlações com a densidade relativa / Lucas de Souza Ferreira. – Tangará da Serra, 2015.

54 f. ; 30 cm. il. (anexo CD-ROM)

Dissertação (Mestrado em Ambientes e Sistema de Produção Agrícola) – Universidade do Estado de Mato Grosso, 2015

Orientador: João Carlos de Souza Maia

Coorientador: Rivanildo Dallacort

1. Solo. 2. Geoestatística. 3. Grau de compactação. I. Autor. II. Título.

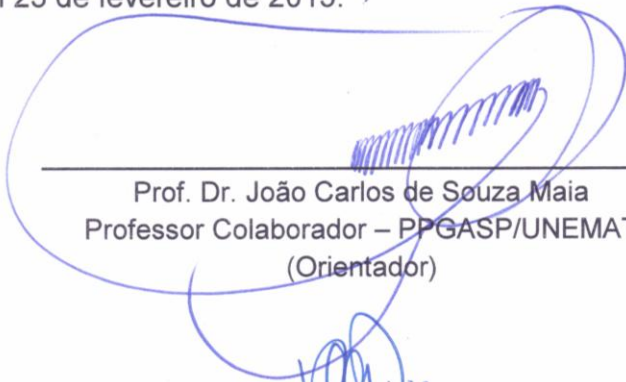
CDU 631.43:633.15:633.34

**LUCAS DE SOUZA FERREIRA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO E  
DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO E SUAS  
CORRELAÇÕES COM A DENSIDADE RELATIVA**


Dissertação apresentada a Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2015.




---

Prof. Dr. João Carlos de Souza Maia  
Professor Colaborador – PPGASP/UNEMAT  
(Orientador)



---

Prof. Dr. Ricardo Santos Silva Amorim  
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT  
(Membro Externo)



---

Prof. Dr. Marco Antonio Camillo de Carvalho  
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT  
(Membro Interno)

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Alancardec Silvério Ferreira, em especial a minha querida mãe, Marinês Terezinha de Souza, fonte de minha inspiração, que em meio às dificuldades trabalhou arduamente para que eu pudesse chegar até aqui, a senhora minha mãe, meu carinho e gratidão;

Ao meu filho Davi Lucas de Almeida Ferreira fonte de toda minha dedicação.

A minha irmã Letícia Silvério de Souza Ferreira e meu irmão Roniclei de Souza Ferreira\* (\*In Memória);

A minha cunhada Catia Dassow e meu padrasto Gilmar Cassol Campanharo pelo apoio dado a minha mãe enquanto estive ausente;

As minhas Sobrinhas Camila Souza Faria, Rayssa Dassow e Kyara Souza, pelo carinho.

## AGRADECIMENTO

A Deus fonte de todo conhecimento e sabedoria;

Aos meus pais pela grande ajuda e colaboração, em especial a minha mãe pela confiança e todo apoio incondicional de sempre;

Ao professor Dr. João Carlos de Souza Maia, pela grande dedicação ao trabalho que exerce junto a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e pela orientação para a realização deste trabalho;

Ao Professor Dr. Rivanildo Dallacort, pela valiosa contribuição como co-orientador;

À Universidade do Estado de Mato Grosso, *campus* Universitário de Tangará da Serra pela oportunidade em realizar essa pós-graduação;

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Ambiente e Sistema de Produção Agrícola (PPGASP) da UNEMAT *campus* Tangará da Serra, pelos ensinamentos;

Ao Engenheiro Agrônomo Diogo Almeida, da Fazenda Espigão, pela amizade e pelo interesse em disponibilizar a área para os estudos;

À UFMT, especialmente ao professor Emilio C. de Azevedo e Marcio W. Roque por possibilitar a realização desse estudo no Laboratório de Física do solo;

Ao Fundo de apoio à cultura da soja (FACS) e Associação dos Produtores de Soja do Mato Grosso (APROSOJA) pelo apoio, confiança e concessão da bolsa de estudos;

Aos colegas e colaboradores do Laboratório de Física do Solo da UFMT, em especial ao Fabrício Tomas Ramos, pelo apoio e dedicação para realização desse estudo;

Aos meus amigos (as) Edgar Silva Nunes, Iracema M. Pavan Nunes, Paulo Nunes, Mayrã Chiocca, Arthur Chiocca Nunes e Eduardo André Ferreira que foram minha segunda família durante toda essa caminhada;

Aos meus amigos (as) Luciana Menegaz, Josias de Carvalho, João Paulo Pereira e Marcos Jorge, que mesmo distantes me apoiaram na concretização desse sonho;

À todos (as) que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	-
ABSTRACT .....	-
INTRODUÇÃO .....	8
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11
Artigo 1: Variabilidade espacial e correlação de atributos físicos solo com a produtividade de grãos de soja e milho.....	14
Artigo 2: A densidade relativa do solo como uma alternativa para determinar unidades de manejo .....	37
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	54

## RESUMO

A compactação do solo pode influenciar na variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e na produtividade das culturas. Assim, conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo indicadores de compactação e produtividade pode ser uma alternativa para definir sítios específicos com foco no manejo localizado, minimizando operações agrícolas e menores impactos ambientais. Dentre as técnicas para avaliar a compactação do solo, a densidade relativa é facilmente entendida e pouco influenciada pelas condições mineralógicas e granulométricas do solo. Deste modo, objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho, bem como correlacioná-los e definir unidades de manejo com base na densidade relativa do solo. O estudo foi realizado em uma área de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico muito argiloso, manejada sob sistema de cultivo mínimo localizada na Fazenda Espigão (latitudes de 14°07'40" S, longitude de 56°58'39" W e altitude de 539 metros) no município de Diamantino, Mato Grosso, Brasil. Coletou-se em uma malha irregular estratificada amostras de produtividade de grãos e deformadas e indeformadas de solo, em uma área de 9,99 ha, na camada de 0,0-0,20 m, totalizando 117 observações. Com estes dados, realizou-se a análise exploratória e gerou os semivariograma, sendo o que melhor ajuste foi testado pela validação cruzada. Na existência de dependência espacial foi feita à interpolação dos dados por meio da krigagem. Em seguida, todos os dados foram correlacionados entre si pelo teste de Pearson ( $P < 0,05$ ). Em um segundo momento, com os dados de densidade relativa foram definidas quatro unidades de manejo e as médias dos atributos físicos do solo e de produtividade de grãos em estudo foram testadas entre as unidades de manejo. Verificou-se que todos os atributos físico-hídricos do solo e de produtividade de grãos apresentou dependência espacial entre forte e moderado com alcance variando de 32,900 a 366,666 m. O modelo esférico foi o mais comum entre as variáveis. A densidade relativa correlacionou significativamente com todas as variáveis em estudo, exceto para argila e areia total. Além disso, verificou-se a possibilidade de definir unidades de manejo com base na densidade relativa do solo. Os indicadores de compactação do solo e de produtividade de grãos das culturas diferenciaram nas unidades de manejo com densidade relativa alta e muito alta (maior que 0,896), sendo que macroporosidade e a porosidade total foram os atributos do solo mais sensível para diferenciar as unidades.

**Palavras-chave:** grau de compactação, atributos físicos do solo, plantio direto, curva de compactação, geoestatística.



## ABSTRACT

Soil compaction can influence in spatial variability of soil physical properties and yield of crops. Thus, knowing the spatial variability of soil attributes compression indicators and productivity can be an alternative to define specific sites focusing on localized management, minimizing agricultural operations and lower environmental impacts. Among the techniques to evaluate soil compaction, the relative density is easily understood and little influenced by the mineralogical and textural soil conditions. Thus, the aim of this study is to evaluate the spatial variability of physical and hydraulic properties of soil and productivity of soybean and corn grain and correlate them and define management units based on the relative density of the soil. The study was conducted in a Oxisol haplorthox very clay, under minimum tillage system located at Farm Espigão (latitude 14°07'40" S, longitude 56°58'39" W and altitude 539 meters) in the municipality of Diamantino, Mato Grosso, Brazil. Samples were collected in an irregular mesh stratified samples of crop yield and soil disturbed and undisturbed, in an area of 9,99 ha in the layer of 0,0-0,20 m, totaling 117 observations. With these data, was held exploratory analysis and generated the semivariogram, the better fit was tested by cross-validation. In existence of spatial dependence was made the data interpolation by kriging. Then, all data were correlated by Pearson's test ( $P < 0,05$ ). In a second stage, of with data relative density were defined four management units and average soil physical attributes and grain yield in the study were tested between management units. It was found that all physical and hydraulic properties of the soil and grain yield showed spatial dependence between strong and moderate ranging from 32,900 to 366,666 m. The spherical model was the most common among the variables. The relative density correlated significantly with all the variables under study, except for clay and total sand. Moreover, there is the possibility of defining management units based on the relative density of the soil. The Compaction indicators and cultures grain yield differed in management units with relative density high and very high (greater than 0,896), wherein the total porosity and macroporosity attributes were soil more sensitive to differentiate units.

**Key-words:** Degree of compaction, soil physical attributes, tillage, compaction curve, geostatistics.

## INTRODUÇÃO GERAL

A região Centro-Oeste destaca-se como a principal produtora de grãos do Brasil com aproximadamente 42 % (81.635.600,00 de toneladas) da produção brasileira na safra agrícola 2013/2014 (194.391.200,00 de toneladas). Nesse cenário, o Estado de Mato Grosso vem se destacando como o maior produtor, responsável por cerca de 60 % da produção (49.054.700,00 de toneladas) do Centro-Oeste brasileiro e aproximadamente 24 % da produção do país (47.702.600,00 de toneladas), com destaque para cultura da soja e milho (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2014).

O elevado nível tecnológico, como o uso de máquinas e implementos agrícolas são um dos principais fatores que contribui para o sucesso da produção agrícola nessas localidades, em decorrência das condições de relevo favorável. Porém, é de consenso que excessivo tráfego de máquinas para realizar as operações agrícolas (semeadura, pulverização, colheita e outras) ou pisoteio animal com o teor de umidade do solo inadequada pode causar modificações na estrutura física do solo (CARVALHO; DINIZ, 1984; KLEIN, 2006).

Dentre as modificações que podem ocorrer à compactação do solo é a principal, por causar maior resistência à penetração de raízes, reduz a porosidade, a condutividade hidráulica de água no solo e a disponibilidade de água e nutrientes (RIBEIRO et al., 2010). Além disso, os efeitos da compactação do solo sobre o acúmulo de matéria seca da parte aérea de diferentes culturas foi verificado por Silva et al. (2006) em Latossolo Vermelho. Freddi et al. (2009) verificou que, com a compactação do solo houve aumento da massa de matéria seca das raízes, da densidade do comprimento radicular e do diâmetro radicular de plantas de milho, em consequência disso, menor produtividade.

Diante disso, avaliar a compactação dos solos agrícola torna-se importante para a continuidade da produção, em especial do Centro-Oeste brasileiro. Para diagnosticar e caracterização da compactação do solo de forma indireta tem-se utilizado a sua densidade aparente e a resistência à penetração. Porém, no campo o método do penetrômetro apresenta algumas dificuldades, como a variação de umidade ao longo do perfil do solo, o que dificultar as interpretações da resistência à penetração (TORRES; SARAIVA, 1999). A densidade do solo apresenta dificuldade na quantificação do grau de compactação, pois apresenta grande amplitude em

função de suas características intrínsecas (mineralogia, textura e teor de matéria orgânica) (BRADY; WEIL, 2008).

Assim, a densidade relativa do solo ( $D_r$ ) obtida pela relação entre a densidade do solo e densidade máxima do solo (ensaio de Proctor normal) é uma nova abordagem proposta para indicar o estado de compactação do solo, (BEUTLER et al., 2008; KLEIN et al., 2009). Diferentemente dos outros métodos, a  $D_r$  é pouco influenciada por alguns atributos do solo, sobretudo da umidade, mineralogia e granulometria, permitindo sua determinação de forma prática e rápida para diferentes tipos de solo, além de permitir avaliar o grau de compactação do solo (BEUTLER et al., 2005).

Estudos nesse sentido foram realizados, a exemplo de Carter (1990) que verificou que valores de  $D_r$  entre 0,77 a 0,84 foram favoráveis para obter máximas produtividades de cereais em solos de textura contrastantes. Em Latossolo Vermelho Suzuki et al. (2007) constataram que o grau de compactação ótimo para o desenvolvimento da soja foi de 0,86. Rosseti et al. (2012) em Latossolo Vermelho de textura argilosa sob sistema plantio direto verificaram que a densidade crítica para produtividade de grãos de soja foi acima de 0,86. Silva et al. (2014) constataram o valor crítico é diferente para as partes de crescimento da planta, sendo que valor de  $D_r$  maior que 0,82 e 0,87 diminuiu a altura de planta e matéria seca de soja, respectivamente, em Latossolo Bruno alumínico típico. Lindstron e Voorhees (1994) observaram que  $D_r$  menor que 0,80 influenciam negativamente na produtividade das culturas por causar, principalmente, a redução da capacidade de armazenagem de água no solo.

Vários são os estudos que avalie o valor de  $D_r$  crítico e ótimo para desenvolvimento das culturas. Entretanto, estudo que a investigam a variabilidade espacial da  $D_r$  e sua correlação com os indicadores de compactação do solo e da produtividade das culturas ainda são escassos. Para isso, a geoestatística tem-se mostrado uma ferramenta de grande utilidade, pois permite o conhecimento da variabilidade espacial e possibilita a interpretação dos resultados com base nos mapas obtidos por meio de interpolação dos dados (CAMPOS et al., 2009). Segundo Bottega et al. (2013) a interpolação dos dados é favorecida quando ocorre melhor ajuste dos parâmetros dos variogramas e da validação cruzada.

Nesse contexto, Rosa Filho et al. (2009) verificaram em Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto que a variabilidade da produtividade de soja ocorrem em função de atributos físicos do solo, em especial da densidade do solo. Santos et al. (2012) verificaram que a dependência espacial moderada para macroporosidade, porosidade total e umidade do solo e forte para microporosidade e densidade do solo de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto. Segundo esses autores, os mapas de distribuição dos atributos físicos do solo são importantes para o manejo do solo sustentável.

Para Molin (2002) o grande número de informações obtidas nos mapas de variabilidade espacial pode dificultar a interpretação dos resultados. Para o autor, uma opção para transformar essas informações úteis para as tomadas de decisão é definir unidades de manejo onde a produtividade das culturas se diferencia, a qual tem como objetivo o manejo localizado minimizando os custos de operação e impactos ambientais, sendo um pressuposto da agricultura de precisão. Wojciechowski et al. (2009) relataram que os atributos do solo também são importante para definição de área de manejo. Santi et al. (2012) verificou que unidades de baixa produtividade agrícola apresentou menor qualidade física do solo.

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho, bem como determinar suas correlações e definir unidades de manejo com base na densidade relativa em um Latossolo Vermelho em sob cultivo mínimo. Para tanto, o trabalho foi dividido em dois artigos, o primeiro foi intitulado de variabilidade espacial e correlação de atributos físicos solo com a produtividade de grãos de soja e milho com o qual objetivou-se determinar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho, além de correlacioná-la com a densidade relativa ( $D_r$ ) de um Latossolo Vermelho, já o segundo foi intitulado de a densidade relativa do solo como uma alternativa para determinar unidades de manejo que teve como objetivo auxiliar o potencial de utilização da densidade relativa como delimitador de unidades de manejo em Latossolo Vermelho cultivado em sucessão soja e milho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 843-849, maio/jun. 2005.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 8, n. 2, p. 27-36, set. 2008.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 44, n. 01, p. 1-9, jan./mar. 2013.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

CAMPOS, M. C. C. et. al. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 297-304, dez. 2009.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Prince Edward Island, v. 70, n. 713, p. 5-433, apr. 1990.

CARVALHO, M.; DINIZ, H. N. Reflexões sobre a compactação de solos agrícolas; suas causas e seus efeitos. **Revista Instituto Geológico**, São Paulo, v. 5, n. 112, p. 59-64, jan./dez. 1984.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2014-2015**. Conab: Brasília, v. 2, n. 2, p. 1-85, out. 2014.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 805-812, abr. 2009.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, set. 2006.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico tipo sob plantio escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, dez. 2009.

LINDSTRON, M. J; VOORHEES, W. B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK C (Org.). **Soil compaction in crop production**, London: Elsevier, 1994. p. 265-286.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 02, p. 83-92, mar./abr. 2002.

RIBEIRO, M. A. V. et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da Densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1157-1164, jul./ago. 2010.

ROSA FILHO, G. et al. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 283-293, jan. 2009.

ROSSETTI, K. V. et al. Atributos Físicos nos Tempos de Adoção de Manejos em Latossolo Cultivado com Soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 02, p. 367-376, abr. 2012.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p.1346-1357, set. 2012.

SANTOS, K. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 08, p. 828-835, ago. 2012.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-escuro Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 31-40, ago. 2006.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 06, p. 1731-1739, jul. 2014.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, Brasília, v. 42, n. 8, p.1159-1167, ago. 2007.

TORRES, E.; SARAIRA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Tiragem: Embrapa soja, 1999. 31 p. (Circular técnica, 23).

WOJCIECHOWSKI, J. C. et al. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 383-391, out./dez. 2009.

## VARIABILIDADE ESPACIAL E CORRELAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS SOLO COM A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA E MILHO

[Revista Brasileira de Ciência do Solo]

### RESUMO

A variabilidade espacial da produtividade das culturas e de alguns atributos físicos do solo pode estar relacionada à presença de camadas compactadas. Assim, é oportuno o diagnóstico da compactação do solo e correlacioná-lo com seus indicadores e de produtividade dos cultivos a fim de auxiliar no planejamento de práticas de manejo específico. Deste modo, objetivou-se determinar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho, além de correlacioná-la com a densidade relativa ( $D_r$ ) de um Latossolo Vermelho. O estudo foi realizado em uma área de 9,99 ha manejada sob sistema de cultivo mínimo localizada no município de Diamantino, Mato Grosso, Brasil. A amostragem foi instalada em uma malha irregular estratificada, na camada de 0-0,20 m, totalizando 117 observações. Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo do tipo deformadas e indeformadas e de produtividade de grãos de soja e milho. Os dados foram analisados pela estatística descritiva e geoestatística. Em seguida, os mapas de distribuição espacial foram correlacionados pelo teste de Pearson ( $P < 0,05$ ). Todos os atributos do solo e produtividade de grãos apresentaram grau de dependência espacial entre forte e moderada, com ajuste aos modelos teóricos exponencial, esférico e gaussiano com alcance de 32,900 a 366,66 m. Verificou-se que a  $D_r$  apresentou correlação negativa com produtividade de grão de soja, condutividade hidráulica saturada, macroporosidade, porosidade total e silte e positiva com produtividade de grão de milho e microporosidade e, assim mostrando uma alternativa para identificar áreas com diferentes graus de compactação com vista ao manejo localizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Densidade relativa, compactação, física do solo, agricultura de precisão.



## **ABSTRACT: SPATIAL VARIABILITY AND CORRELATION OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES WITH THE PRODUCTIVITY OF SOYBEANS AND CORN**

The spatial variability of crop yield and some soil physical properties can be related to the presence of compacted layers. Thus, the diagnosis of soil compaction and relate it to their indicators and crop productivity may be important to assist in planning of specific management practices. Thus, the objective was to determine the spatial variability of physical soil properties and productivity of soybean and corn grains, and correlate it with the relative density (RD) of an Oxisol. The study was conducted in an area of 9,99 ha managed under minimum tillage system in the municipality of Diamantino, Mato Grosso, Brazil. Sampling was installed in a stratified irregular mesh in the layer of 0-0,20 m, totaling 117 observations. At each point, soil samples from the disturbed and undisturbed type and productivity of soybeans and corn were collected. Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics. Then, the spatial distribution maps were correlated by Pearson's test ( $P < 0,05$ ). All soil attributes and grain yield present spatial dependence between strong and moderate, with exponential fit to the theoretical models, spherical and Gaussian with a range from 32,900 to 366,66 m. It was found that RD was negatively correlated with soybean grain yield, saturated hydraulic conductivity, macroporosity, total porosity and positive and silt with corn grain yield microporosity and, thus showing an alternative to identify areas with different degrees of compaction aimed at specific management.

**KEYWORDS:** Relative density, compaction, soil física, precisão agriculture.

### **INTRODUÇÃO**

A região Centro-Oeste do Brasil, em especial o Estado de Mato Grosso, vem-se destacando como o principal produtor de grãos do país, responsável por cerca de 24 % (47.702.600,00 de toneladas) da produção brasileira na safra 2013/2014 (194.657.600,00 de toneladas), com destaque para as culturas de soja, milho, girassol e algodão (Conab, 2014). O uso novas tecnologias, como máquinas, implementos agrícolas e melhoramento de plantas, além de condições de relevo e

clima favorável são fatores importantes para a maximização da produção nessa região.

Outro fator foi adoção do manejo conservacionista do solo, como sistema plantio direto e cultivo mínimo, o que têm contribuído muito para melhoria das condições químicas, físicas e biológicas do solo. Entretanto, mesmo em sistemas conservacionistas, o uso de máquinas e implementos agrícolas sem respeitar as condições de umidade adequada causa modificações na qualidade física do solo, tendo como principal efeito a sua compactação (Richart et al., 2005).

A formação de camadas compactadas pode causar maior resistência à penetração das raízes, modificações morfológicas, decréscimo na divisão meristemática, aumento no diâmetro da raiz, reduz o volume de solo explorado por ela (Freddi et al., 2009), redução da absorção de água e nutrientes, e em consequência menor produtividade das culturas (Ribeiro et al., 2010). Além disso, pode causar modificação na porosidade e menor condutividade hidráulica de água no solo (Suzuki et al., 2007). Por outro lado, a elevação da compactação do solo para algumas culturas é desejada, sobretudo para as gramíneas, pois propicia um maior contato solo/raiz promovendo a absorção de água e nutrientes (Veen et al., 1992).

Para verificar a existência de camadas compactadas, a densidade e a resistência do solo à penetração são os principais indicadores utilizados. Porém, em condições de campo, o método do penetrômetro apresenta algumas dificuldades, como variação da umidade ao longo do perfil do solo, o que pode dificultar a interpretação dos resultados (Torres e Saraiva, 1999). Já a densidade do solo apresenta grande amplitude em função de suas características intrínsecas (mineralogia, textura e teor de matéria orgânica) (Brady e Weil, 2008).

Nesse sentido, a densidade relativa ( $D_r$ ) determinada pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor, tem-se apresentada como uma alternativa promissora para identificar camadas compactadas e determinar níveis críticos e favoráveis para o desenvolvimento das plantas (Carter, 1990; Beutler et al., 2008), uma vez que é possível conhecer o grau de compactação, além de ser menos afetada pela variação da umidade do solo, composição mineralógica e facilmente entendida (Klein, 2006).

Apesar da existência de vários estudos com objetivo de avaliar o grau de compactação crítico para diferentes culturas, ainda são escassos trabalhos que avaliem a variabilidade da densidade relativa e sua correlação com atributos do solo e de planta, uma vez que estudos têm demonstrado que a variabilidade dos atributos solo e de produtividade das culturas não ocorre ao acaso, isto é, apresentam dependência espacial e pode estar relacionado com mais de um fator (Wojciechowski et al., 2009; Santos et al., 2012).

Conhecer essas informações pode ser importante para estabelecer um programa de gerenciamento localizado, sendo um dos princípios básicos da agricultura de precisão. Portanto, objetivou-se determinar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho, além de correlacioná-la com a densidade relativa de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico muito argiloso, em uma área manejada sob sistema de cultivo mínimo.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado na fazenda Espigão no município Diamantino, Estado de Mato Grosso, localizada na latitude de 14°07'40'' S, longitude de 56°58'39'' W, com altitude de 539 metros, no ano agrícola 2013/2014. O município apresenta precipitação anual de 1793 mm com temperatura média anual de 24,97 °C (Souza et al., 2013). Segundo Köppen, o clima da região é classificado como Aw, caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo plano, conforme Santos et al. (2013). A caracterização química e física do solo na camada 0-0,20 m, é apresentada na Tabela 1.

A vegetação original da área em estudo era do tipo floresta tropical subcaducifólio. No ano agrícola 1987/88 fez-se o desmatamento com uso de esteiras e correntes, o qual foi enleirada e queimada. Em seguida o solo foi gradeado na profundidade de 0-0,20 m e no mesmo ano foi semeada a cultura do arroz. Deste período até a safra 1999/2000 cultivou-se soja e milho em sucessão, sendo a adubação realizada na linha de semeadura. Da safra de 2000/01 até a de 2003/04 cultivou-se algodão. De 2004/05 até a de 2013/14 cultivou-se soja e milho

em sucessão, sem revolver o solo e o calcário e os fertilizantes passaram a serem aplicados a lanço.

A semeadura mecanizada da soja (*Glycine max* L.) foi realizada em 28 de outubro de 2013 (Cultivar M 7639 RR, ciclo médio 114 dias), sob espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 19 sementes  $m^{-1}$ , como população final de aproximadamente 422 mil plantas por ha. Adubação por época da semeadura foi realizada a lanço utilizando a técnica da taxa variada, 265 a 280  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 00-32-00 e 150 a 170  $kg\ ha^{-1}$  de cloreto de potássio em cobertura. Já a semeadura do milho (*Zea mays* L.) variedade Penta TL de ciclo de aproximadamente 135 dias ocorreu em 10 de fevereiro de 2014, no espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 2,5 sementes  $m^{-1}$ , com população final de 55.555 mil plantas por ha. Adubação por época da semeadura foi realizada a lanço utilizando a técnica da taxa variada, 180 a 200  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 00-25-00 e 80 a 100  $kg\ ha^{-1}$  de ureia em cobertura na fase de quatro folhas desenvolvidas (V4).

A área da pesquisa foi de 9,99 ha de um talhão de 56 ha e os pontos amostrais foram georreferenciados por meio do sistema de posicionamento por satélites “Glonass”, utilizando o equipamento modelo Topcon Hiper Lite® com a coletora FC200, com erro máximo de 5 mm, em esquema de amostragem do tipo irregular estratificada, isto é, com uma direção definida, totalizando 117 observações (Figura 1). Em cada ponto foram coletadas amostras de solo do tipo deformadas e indeformadas contemplando a camada de solo de 0-0,20 m, sendo a média da camada intermediária, ou seja, de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. As amostras foram coletadas na entre linha de semeadura na fase florescimento e polinização (R1) da cultura da soja (Ritchie et al., 1977). As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso (FAMEVZ/UFMT) campus de Cuiabá, MT.

As amostras deformadas de solo foram coletadas com trado holandês de 0,10 m, as quais foram utilizadas para determinar a granulometria (areia total - AT, argila - AG, silte - SIL) do solo pelo método da pipeta, com agitação lenta por 16 horas para acelerar a dispersão física das partículas (Embrapa, 2011). As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de “kopeck”, as quais foram utilizadas para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (0,05 x 0,05 m); microporosidade (MIP) por meio da mesa de tensão Eijkelkamp

(caixa de areia) à tensão de 6 KPa, sendo a porosidade total (PT) calculada com base nos valores de densidade de partículas (DP) pontual e macroporosidade (MAP) pela diferença, isto é,  $MAP = PT - MIP$ ; e a condutividade hidráulica saturada (Embrapa, 2011).

Para a densidade relativa do solo ( $D_r$ ), determinou-se a curva de compactação do solo com reuso de amostra, foram coletadas aproximadamente 9 kg de solo em trajeto longitudinal dentro da área experimental e sua determinação foi realizada conforme a norma NBR 7182 (Abnt, 1986); e seguindo os procedimentos de preparo e umedecimento do solo, conforme descrito em Ramos et al. (2013). A curva de compactação foi obtida pelo ajuste dos pares de valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) e densidade do solo ( $D_S$ ), ajustada por meio de regressão, conforme a equação polinomial quadrática ( $D_s = y_0 + aU - bU^2$ ) em que “ $y_0$ ,  $b$ ,  $c$ ” foram os coeficientes estimados. Depois desse ajuste, a  $D_r$  para cada ponto amostral foi obtida pela relação entre os valores observados de densidade do solo e os de densidade máxima de compactação do solo (Equação 1), de tal forma a obter cada ponto amostral um valor de  $D_r$ , em que quanto mais próximo de 1, mais compactado estará o solo (Klein, 2006).

$$D_r = \frac{D_S \text{ (kg dm}^{-3}\text{)}}{DMS \text{ (kg dm}^{-3}\text{)}} \quad \text{Eq. 1}$$

sendo  $D_S$ : Densidade do solo; e  $DMS$ : Densidade máxima do solo.

A colheita foi realizada manualmente em 07/02/2014 para soja e 04/07/2014 para milho, onde em cada ponto amostral contou-se o número de planta e colheu-se em quatro lineares para soja e dois milho metros lineares para milho. Em seguida, as amostras foram levadas ao laboratório para proceder à debulha manual e obter a massa dos grãos, sendo os dados transformados em  $\text{kg ha}^{-1}$  (14 % base úmida).

Todos os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva (mínima, média, máxima, desvio-padrão e coeficiente de variação) através do *software* Assistat versão 7.5 beta (Silva e Azevedo, 2009). Em seguida, foram analisadas quanto à dependência espacial, sendo que o ajuste do semivariograma foi realizado utilizando-se os parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ), o alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C$ ). Os critérios para ajuste e seleção do melhor modelo foram: a) menor soma de quadrados de resíduos (SQR) e, b) maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

A decisão final do modelo que representou o melhor ajuste foi realizada pela validação cruzada, utilizando o *Gamma Design Software* (GS<sup>+</sup>) (Robertson, 2008). O grau de dependência espacial dos semivariogramas foi avaliado conforme sugestões de Cambardella et al. (1994) apresentado na Equação 2:

$$E \% = \frac{C_o}{(C+C_o)} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

sendo E %: coeficiente de efeito pepita em porcentagem; Co: efeito pepita; e C + Co: patamar.

A interpretação proposta para o E % foi a seguinte: E % ≤ 25 % indica forte dependência espacial; 25 % < E % ≤ 75 % indica moderadamente dependência espacial; e E % > 75 % indica fraca dependência espacial. Quando verificada a dependência espacial dos dados fez-se a interpolação através da krigagem em grid de 5 x 5 m, assim, todos os modelos em análise tiveram os mesmos números de linha e colunas correspondentes, utilizando o GS<sup>+</sup> (Robertson, 2008). Em um segundo momento, os mapas de distribuição espacial foram correlacionados entre si ao nível de 5 % (P < 0,05) de probabilidade pelo teste de Pearson, por meio do Minitab ® 8.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise estatística dos dados para camada de 0,0-0,20 m são apresentados na Tabela 2, segundo a classificação de Warrick e Nielsen (1980) os coeficiente de variação (CV) foram baixa (CV < 12 %) e média (12 % < CV < 60 %), com exceção da condutividade hidráulica (Ko) que apresentou CV alta (CV > 62 %), o que pode indicar a existência de heterogeneidade dos dados.

Valor de CV alto para Ko também foi verificado por Santos et al. (2012), de acordo esse autor pode estar relacionado com variações estruturais do solo (porosidade) ou com a metodologia de análise adotada. Ainda de acordo com esses autores, o maior valor de CV para SIL quando comparado às frações areia e argila pode estar relacionado à sua maior mobilidade no solo.

Os valores de coeficientes de assimetria (Cs) apresentaram distribuição assimétrica a direita (Cs > 0) e a esquerda (Cs < 0), já a curtose (Ck) apresentou distribuição leptocúrtica (Ck > 0) e platicúrtica (Ck < 0), conforme Webster (2001). Mesmo verificando uma distribuição assimétrica, os dados seguiram uma tendência de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (W) e Lilliefors (D) ao nível de 5 % (P >

0,05) de erros, exceto para condutividade hidráulica (Ko) e silte (SIL), corroborando com Eguchi et al. (2003) e Santos et al. (2012), segundo esses autores pode estar relacionado com a presença de valores extremos.

Paz-Gonzales et al. (2001) relataram que dados com distribuição normal apresenta melhores resultados no processo de interpolação (krigagem), mas Folegatti (1996) salienta que em geoestatística o conhecimento da distribuição de frequência da variável não é uma exigência para os cálculos (semivariograma).

Na tabela 3, são apresentados os modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimental. Nota-se que os dados ajustaram-se aos modelos estatísticos exponencial, esférico e gaussiano com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior 75 %, exceto para AG (41 %). Segundo Azevedo (2004) valores de  $R^2$  acima de 50 % apresenta melhor estimativa de valores em locais não amostrados pelo método de interpolação krigagem ordinária.

Verificou-se dependência espacial forte para Ko; PT; AG; PGS e PGM e moderada para Dr, MAP; MIP; AT e SIL segundo a classificação de Cambardela et al. (1994), em concordância com os resultados óbitos por Santos et al. (2012) avaliando a dependência espacial de alguns atributos físico (densidade do solo, umidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do solo em plantio direto na camada de 0-0,10 m.

As variáveis em estudo apresentaram valores de alcance (A) de 32,900 (PT) a 366 m (MIP), isso significa, até que ponto as amostras são correlacionadas entre si, ou seja, a distância máxima de dependência espacial entre as amostras (Panosso et al., 2008). Segundo Carvalho et al. (2010) essas informações permitem o delineamento de futuras amostragem caso as condições de estudo seja as mesmas em questão, uma vez que o alcance pode ser atribuído em partes ao manejo e as características do solo.

A seleção do melhor modelo foi realizada por meio da validação cruzada, assim, na Tabela 4 são apresentados os parâmetros da validação dos modelos teóricos de semivariograma ajustados para os atributos do solo e produtividade de grãos.

Observa-se que alguns coeficientes lineares ( $y_0$ ) e angulares ( $a$ ) foram significativos, com exceção do coeficiente angular de AG, AT, SIL, PGS e PGM, o que segundo Bottega et al. (2013) pode estar relacionado com a maior dispersão dos pontos em torno da relata ideal ( $y_0=0$  e  $b=1$ ), o mesmo pode ser confirmado

com os baixos valores de coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) ( $r < 7,00$ ) e valores de erro padrão da estimadas (EPE) diferentes de zero, isso pode refletir em pequenas pontuações isoladas nos mapas temáticos após a krigagem.

Analisando os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da validação cruzada observa-se que a PT (0,143) e SIL (0,100) apresentaram os menores valores. As demais variáveis apresentam coeficientes maiores que 0,243. De acordo com Queiroz et al. (2011), este é um critério que pode ser utilizado para avaliar o semivariograma, pois quanto maior os coeficientes de determinação mais confiável serão as informações fornecidas no processo de interpolação.

Apesar de alguns coeficientes de correlação e determinação sendo relativamente baixo e apresentando erros maiores que zero, verifica-se que o teste F da regressão foi altamente significativa ( $P < 0,0001$ ) para todas as variáveis analisadas, sendo possível, dessa forma, realizar a interpolações de valores para locais não amostrados. Assim, baseado nos modelos do semivariograma e parâmetros ajustados realizou a interpolação dos dados por meio da krigagem ordinária e os mapas de variabilidade são apresentados na Figura 2.

Nota-se que os mapas com maior continuidade na área foram os que apresentam os melhores valores dos parâmetros de ajuste do semivariograma e, ou validação cruzada por outro, lado, os mapas com pequenas machas podem ser reflexos da baixa precisão da estimada de valores em locais não amostrados, isto é, na krigagem, conforme verificado por Bottega et al. (2013).

Verificou-se que os maiores valores de Dr e PGM (Figura 2 A e J) ocorrem na abrangência da região noroeste do mapa, que correspondem aos menores valores de MAP e PT (Figura 2 C e E). Já na região norte do mapa verificou maiores de valores de MIP, AG e SIL e menor AT, ao contrário da região sul do mapa, indicando possível correlação entre as variáveis. Por outro lado, a Ko e PGS visualmente apresentaram comportamento espacial diferente das demais variáveis.

Segundo Campos et al. (2009) essas informações são importantes para realizar um planejamento agrícola bem sucedido, isto é, podem ser utilizados como base para aplicação de práticas de manejo em área específica (por exemplo, descompactação de áreas compactas, aplicação de fertilizantes etc.), além disso, essas informações são importantes para definir áreas de manejo, sendo condições excelências para agricultura de precisão.



Para confirmar as possíveis relações acima discutida, na Tabela 5 é apresentada a matriz de correlação de Person ( $P < 0,05$ ) entre os mapas dos atributos físicos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho.

Observa-se correlação inversa e alta entre a Dr ( $r \geq 0,6$ ) e MAP e PT. Constatou correlação inversa e fraca ( $r < -0,3$ ) com PGS e KSAT e correlação inversa e moderada com SIL ( $-0,3 \leq r < -0,6$ ), de acordo com classificação proposta por Callegari-Jacques (2003), corroborando com os resultados obtidos por Mentgnes et al. (2010). De acordo com esses autores, a intensidade do tráfego de máquinas agrícolas em plantio direto de 13 anos causou compactação do solo com efeito negativo nas propriedades físicas e hídricas do solo, com redução principalmente da macroporosidade e porosidade total.

Suzuki et al. (2007) verificaram que a condutividade hidráulica, macroporosidade e produtividade de soja reduz com o aumento do grau compactação em um Latossolo Vermelho sob diferentes manejo, em concordância com os verificados nesse estudo.

Nota-se ainda, correlação positiva e moderada entre a Dr e a MIP, isto é, à medida que aumenta a Dr o mesmo ocorre com a MIP, concordando com os resultados obtidos por Silva et al. (2006) que a microporosidade tende aumentar com a compactação do solo, isso pode aumentar a retenção de água no solo, porém tornando esse maior volume indisponível para as plantas.

Analisando a correlação entre a Dr e a PGS e PGM, observou correlação significativa negativa fraca ( $r < -0,3$ ) e positiva moderada, respectivamente. O contraste observado na correlação pode estar relacionado às diferenças morfológicas das plantas, sobretudo das raízes, pois segundo relatos de Freddi et al. (2009) quanto maior o diâmetro da raiz, maior é a força exercida no processo de alongamento das células do meristema radicular para penetração em determinada camada de solo, e conseqüentemente menor crescimento das raízes, o que pode resultar em perda de produtividade.

Com base nessas informações, pode-se dizer que a cultura da soja por apresentar um sistema radicular com maior diâmetro quando comparado ao do milho seja mais suscetível ao aumento dos níveis de compactação do solo, que nesse estudo foi de 0,84 a 0,94 (Figura 3 A), em concordância com os resultados obtidos por Suzuki et al. (2007) que constatou que Dr acima de 0,86 em Latossolo Vermelho

Distroférico tipo foi considerada prejudicial para produtividade de grãos de soja. Para cultura do milho, provavelmente, o maior contato do solo com as raízes de milho, proporcionando um adequado suplemente de água e nutrientes, conforme observado por Veer et al. (1992), conseqüentemente maior produtividade.

Assim, em uma área onde são cultivadas duas culturas que respondem diferentemente aos graus de compactação do solo, como é o caso da área em estudo, faz-se necessário julgar financeiramente se as perdas ou ganhos com as culturas compensa realizar ações que possam aliviar possíveis camadas compactadas.

Ainda analisando a matriz de correlação, os valores com forte correlação entre a Dr e PT e MAP ( $r > -0,6$ ) sugere que a Dr pode ser estimada por estes atributos. Desta forma, realizou análise de regressão a fim de determinar um modelo matemática que seja capaz de estimar a Dr (Tabela 6).

Observa-se que os ajustes de pares entre a Dr e MAP e PT coeficientes estimados foram altamente significativo ( $P < 0,0001$ ), com coeficiente de correlação ( $r$ ) forte ( $r > 0,79$ ) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) explicou mais de 59 % da variação da Dr, mesmo sendo um valor considerando baixo, o erro padrão da estimativa próximo de zero e a regressão foi altamente significativa ( $P < 0,0001$ ). Para as condições em estudo, esses resultados sugerem que, na ausência da Dr, a mesma pode ser estimada com base nos valores de PT e MAP.

Pelo discutido acima, o aumento do grau de compactação na área pode influenciar na variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo e na produtividade das culturas. Deste modo, os mapas de variabilidade espacial são ferramentas importantes para visualizar possíveis áreas que mereçam atenção no planejamento agrícola. Entretanto, para as tomadas decisões, são importantes outros estudos para identificar quais são as áreas prioritárias.

## **CONCLUSÕES**

1. A densidade relativa apresentou-se como uma alternativa para identificar subáreas com maiores e menores níveis de compactação e assim contribuir para o planejamento do manejo localizado do solo;
2. A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e de produtividade de grãos de soja e milho apresentou correlação negativa com produtividade de grãos de soja,

condutividade hidráulica saturada, macroporosidade, porosidade total e silte e positiva com produtividade de grão de milho e microporosidade e, assim, a porosidade total poderia ser usada para estimar a  $D_r$ , na impossibilidade desta.

3. As variáveis em estudo apresentaram dependência espacial entre forte e moderada com ajustes aos modelos dos semivariogramas exponencial, esférico e gaussiano, assumindo diferentes alcances (32,900 a 366,666 m).

### **AGRADECIMENTOS**

Ao Fundo de Apoio Cultura da Soja (FACS), pela concessão de bolsa de estudos. Os agradecimentos são extensivos ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade do Estado de Mato Grosso (FAMEVZ), por ceder o espaço físico para realização da pesquisa e a Fazenda Espigão pela concessão da área experimental.

### **REFERÊNCIAS**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT; 1986. 10p.

Azevedo EC. Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso [Tese]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2004.

Beutler NA, Freddi OS, Leone CL, Centurion JF. Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. Rev. Biol. Ciênc. Terra, 2008;8:27-36.

Bottega EL, Queiroz DM, Pinto FAC, Souza CMA. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. Rev. Ciênc. Agron. 2013;44:1-9.

Brady NC, Weil RR. The nature and properties of soils. 14nd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2008.

Callegari-Jacques SM. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artemed, 2003.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin T B, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1994;58:1501-1511.

Campos MCC, Marques Júnior J, Pereira GT, Souza ZM, Montanari R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 2009;13:297-304. doi:org/10.1590/S1415-43662009000300011

Carter MR. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine Sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 1990;70:425-433.

Carvalho SRL, Vilas Boas GS, Fabigas FS. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. *Cad. Geociênc.* 2010;7:63-79.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2014-2015. Brasília: Conab; 2014.

Eguchi ES, Silva EL, Oliveira MS. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas "In Situ". *Ciênc. Agrotéc.* 2003;1607-1613. (Edição Especial).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solo. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.

Folegatti MV. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso [Tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo; 1996.

Freddi OS, Centurion JF, Duarte AP, Peres FSC. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 2009;33:805-812. doi:org/10.1590/S0100-06832009000400006

Klein VA. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Rev. Ciênc. Agroveter.* 2006;5:26-32.

Mentges MI, Reichert JM, Rosa DP, Vieira DA, Rosa VT, Reinert DJ. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. *Pesq. Agropec. Bras.* 2010;45:315-321.

Panosso AR, Pereira GT, Marques Júnior J, La Scala Júnior N. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. *Eng. Agríc.* 2008;28:227-236. doi:org/10.1590/S0100-69162008000200003

Paz-Gonzalez A, Taboada Castro MT, Vieira SR. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. *Can. J. Soil Sci.* 2001;81:469-479.

Queiroz RP, Lauzarini E, Santos ML, Carvalho MP, Santos C. Inter-relação entre a produtividade da soja e da compactação do solo sob pastagem degradada no Cerrado brasileiro. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 2011;35:1579-1588. doi:org/10.1590/S0100-06832011000500012

Ramos FT, Ramos DT, Maia JCS, Serafim M, Azevedo EC, Roque MW. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: Com e sem reuso de amostras. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 2013;17:129–136.

Ribeiro MAV, Novais RF, Faquin V, Ferreira M, Furtini Neto AE, Lima JM, Villani EEMA. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da Densidade do solo e a doses de fósforo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 2010;34:1157-1164. doi:org/10.1590/S0100-06832010000400015

Richart A, Tavares Filho J, Brito OR, Llanillo RF, Ferreira R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Ciênc. Agrár.* 2005;26:321-344. doi:org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321

Ritchie SW, Hanway JJ, Thompson HE, Benson GO. How a soybean plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology. Coop. Ext Service; 1977. (Special report).

Robertson, G. P. GeoStatistics for the environmental sciences: Gamma Design Software. Plainwell: Michigan USA; 2008.

Santos D, Souza EG, Nóbrega HP, Bazzi CL, Gonçalves Júnior AC. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 2012;16:843-848.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira V A, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Cunha TJF, Oliveir JB. Sistema Brasileira de classificação do solo. 3<sup>a</sup> ed. Brasília: Embrapa Solos; 2013.

Silva FAS, Azevedo CAV. Principal componets analysis in the Software Assisat-Statistical Attendance In: Annals the 7nd. World Congresso computers in agriculture; junho 2009; Reno. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2009.

Silva SR, Barros NF, Costa LM. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.* 2006;10:842-847. doi:org/10.1590/S1415-4366200600040000

Souza AP, Mota LL, Zamadel T, Martim CC, Almeida FT, Paulino J. Classificação climática e balanço hídrico climático no Estado de Mato Grosso. *Nat.* 2013;1:34-43. doi:org/10.14583/2318-7670.v01n01a07

Suzuki LEAS, Reichert JM, Reinert DJ, Lima CLR. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 2007;42:1159-1167.

Torres E, Saraiva OF. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja; 1999. (Circular Técnica, 23).

Veen BW, Van Noordwijk M, De Willigen P, Boone FR, Kooistra MJ. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. *Plant. Soil.* 1992;139:131-138.

Warrick AW, Nielsen DR. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (editor). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press; 1980.

Webster, R. Statistics to support soil research and their presentation. *Eur. J. Soil Sci.* 2001;52:331-340.

Wojciechowski JC, Shumacher M V, Pires Caf, Madruga, PRA, Kilca, RV, Brun EJ, Silva CRS, Vaccaro S, Rondon Neto, RM. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. *Ciênc. Florest.* 2009;19:383-391.

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Camada (m)	pH água	P	K	Ca	Mg	Al	H	MOS	AT	AG	ST	DP
		mg dm <sup>-3</sup>				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		g dm <sup>-3</sup>		----- g kg <sup>-1</sup> -----		Mg dm <sup>-3</sup>
0,0-0,20	5,8	11,05	36	2,9	1,1	0,0	4,9	74,7	360,5	598,5	40	2,45

P: fosforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, Al: alumínio, H: hidrogênio, MOS: matéria orgânica do solo; AT: areia total; AG: argila; ST: silte; e DP: densidade de partícula

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Atributos do solo	Máxima	Média	Mínima	DP	CV (%)	Cs	Ck	p-valor
Dr	0,964	0,868	0,773	0,030	3,673	0,10	- 0,44	0,341 (w)
Ko, cm h <sup>-1</sup>	3,129	0,614	0,006	0,710	115,768	1,92	4,08	0,000
MAP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,181	0,095	0,046	0,023	24,463	0,62	1,12	0,150 (D)
MIP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,423	0,396	0,352	0,013	3,399	- 0,33	- 0,15	0,078 (w)
PT, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,551	0,499	0,448	0,017	3,537	0,35	0,58	0,233 (w)
AG, g kg <sup>-1</sup>	642,187	598,744	545,501	16,951	2,831	- 0,42	0,02	0,238 (w)
AT, g kg <sup>-1</sup>	397,574	360,721	316,342	17,893	4,960	0,05	- 0,63	0,558 (w)
SIL, g kg <sup>-1</sup>	76,694	40,534	22,951	10,461	25,807	1,14	1,77	0,000
PGS, kg ha <sup>-1</sup>	5736,355	3603,517	4658,221	419,331	9,001	0,29	- 0,22	0,882 (w)
PGM, kg ha <sup>-1</sup>	15138,458	10515,046	5245,252	1820,256	17,311	0,38	-0,19	0,277 (w)

Dr: densidade relativa; Ko: condutividade hidráulica saturada; MAP: macroporosidade; MIP: Microporosidade; PT: porosidade total; AR: argila; AT: areia total; SIL: silte; PGS: produtividade de grãos de soja; PGM: produtividade de grãos de milho; DP: desvio padrão; CV (%); coeficiente de variação em porcentagem, Cs: assimetria (Cs > 0 tem-se a distribuição assimétrica à direita; Cs < 0 a distribuição é assimétrica à esquerda; e se Cs = 0 a distribuição é simétrica); Ck: curtose (Ck: 0 a distribuição é mesocúrtica; Ck < 0 é platicúrtica; e Ck > 0 é leptocúrtica); e p-valor: teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) e Lilliefors (D) ao nível de 5% (P > 0,05) de erro.



Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais dos atributos do solo e produtividade de grãos de soja e milho da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Variáveis	Modelos	Parâmetros				
		R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	A (m)	E (%)
Dr	Exponencial	0,901	0,00034	0,00089	106,200	38,202
Ko, cm h <sup>-1</sup>	Esférico	0,820	0,001	0,348	76,200	0,287
MAP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Esférico	0,934	0,00032	0,00065	306,000	49,231
MIP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Esférico	0,757	0,00010	0,00021	366,600	47,619
PT, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Esférico	0,756	0,00000	0,00028	32,900	0,000
AG, g kg <sup>-1</sup>	Exponencial	0,413	6,300	212,400	56,700	2,966
AT, g kg <sup>-1</sup>	Gaussiano	0,921	180,100	264,400	190,006	68,116
SIL, g kg <sup>-1</sup>	Exponencial	0,956	53,200	106,500	237,600	49,953
PGS, kg ka <sup>-1</sup>	Esférico	0,856	100,000	157500,000	39,200	0,063
PGM, kg ha <sup>-1</sup>	Esférico	0,914	1000,00	222.220.000,000	62,300	0,045

Dr: densidade relativa; Ko: condutividade hidráulica saturada; MAP: macroporosidade; MIP: Microporosidade; PT: porosidade total; AR: argila; AT: areia total; SIL: silte; PGS: produtividade de grãos de soja; PGM: produtividade de grãos de milho; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; A: alcance; e E%: coeficiente de efeito pepita em porcentagem (E% < 25; 25 ≤ E% ≤ 75 e E% > 75 indica forte, moderada e baixa dependência espacial, respectivamente)

Tabela 4. Parâmetros estimados da validação cruzada dos atributos do solo e produtividade de grãos de soja e milho da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Atributo do solo	Coeficiente <sup>(1)</sup>		r	r <sup>2</sup>	n	EPE	P <sup>(2)</sup>
	y0	a					Teste F
Dr	0,150*	0,830**	0,493	0,202	112	0,027	< 0,0001
Ko, cm h <sup>-1</sup>	0,099**	0,816**	0,539	0,291	103	0,532	< 0,0001
MAP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,000*	1,004**	0,508	0,258	115	0,019	< 0,0001
MIP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,029*	0,926**	0,498	0,248	114	0,011	< 0,0001
PT, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,116**	0,764**	0,378	0,143	115	0,016	< 0,0001
AG, g kg <sup>-1</sup>	30,426 <sup>ns</sup>	0,949**	0,644	0,415	110	12,039	< 0,0001
AT, g kg <sup>-1</sup>	11,534 <sup>ns</sup>	0,968**	0,710	0,505	112	11,752	< 0,0001
SIL, g kg <sup>-1</sup>	11,950 <sup>ns</sup>	0,706**	0,316	0,100	112	9,527	0,0007
PGS, kg ha <sup>-1</sup>	1048,615 <sup>ns</sup>	0,773**	0,403	0,163	98	372,659	<0,0001
PGM, kg ha <sup>-1</sup>	332,306 <sup>ns</sup>	0,9663**	0,689	0,474	110	1087,227	< 0,0001

Dr: densidade relativa; Ko: condutividade hidráulica saturada; MAP: macroporosidade; MIP: Microporosidade; PT: porosidade total; AR: argila; AT: areia total; SIL: silte; PGS: produtividade de grãos de soja; PGM: produtividade de grãos de milho; (1): coeficiente linear (y0) e coeficiente angular (a); \*: significativo ao 5 % de probabilidade de erro (P < 0,05); \*\*: significativo ao 1 % de probabilidade de erro (P < 0,01); ns: não significativo (P > 0,05); r: coeficiente de correlação; r<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; n: número de observações; EPE: erro padrão da estimativa; e (2): probabilidade ao nível de 5% (P ≤ 0,05) de erro pelo teste F

Tabela 5. Matriz de correlação entre mapas de atributos físicos do solo e da produtividade de grãos de soja e milho da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Variáveis	DR	PGS	PGM	Ko	MAP	MIP	PT	AG	AT	SIL
Dr	1,000									
PGS	-0,186*	1,000								
PGM	0,571*	-0,169* *	1,000							
Ko	-0,225*	0,119*	0,036**	1,000						
MAP	-0,803*	-0,009 <sup>ns</sup>	-0,512*	0,110*	1,000					
MIP	0,393*	0,193*	0,244*	-0,180*	-0,788*	1,000				
PT	-0,772*	0,096**	-0,408*	0,341*	0,650*	-0,222*	1,000			
AG	0,042**	0,250*	0,016 <sup>ns</sup>	-0,279*	-0,370*	0,688*	0,130*	1,000		
AT	0,254*	-0,369*	0,104*	-0,459*	0,144*	-0,603*	-0,305*	-0,809*	1,000	
SIL	-0,321*	0,337*	0,168*	0,204*	0,087*	0,351*	0,366*	0,471*	-0,717*	1,000

Dr: densidade relativa; PGS: produtividade de grãos de soja; PGM: produtividade de grãos de milho; Ko: condutividade hidráulica saturada; MAP: macroporosidade; MIP: Microporosidade; PT: porosidade total; AR: argila; AT: areia total; SIL: silte; \* e \*\* significativo ao nível de 5% ( $0,01 < p < 0,05$ ) e 1% ( $p > 0,01$ ) de erro, respectivamente; e ns não significativo ( $p \geq 0,05\%$ )

Tabela 6. Regressão entre os valores observados de porosidade total e densidade relativa da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso

Atributo do solo	Coeficiente <sup>(1)</sup>		r	r <sup>2</sup>	n	EPE	P <sup>(2)</sup>
	y0	a					Teste F
MAP, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	1,010±0,001***	-1,232±0,015***	0,803	0,644	3685	0,011	< 0,0001
PT, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	1,568±0,009***	-1,372±0,018***	0,772	0,595	3685	0,012	< 0,0001

MAP: macroporosidade; PT: porosidade total; \*\*\* (P < 0,0001): altamente significativo; (1): coeficientes linear (y0) e angular (a); r: coeficiente de correlação; r<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; n: número de observações; EPE: erro padrão da estimativa; e (2): probabilidade ao nível de 5% (P ≤ 0,05) de erro pelo teste F

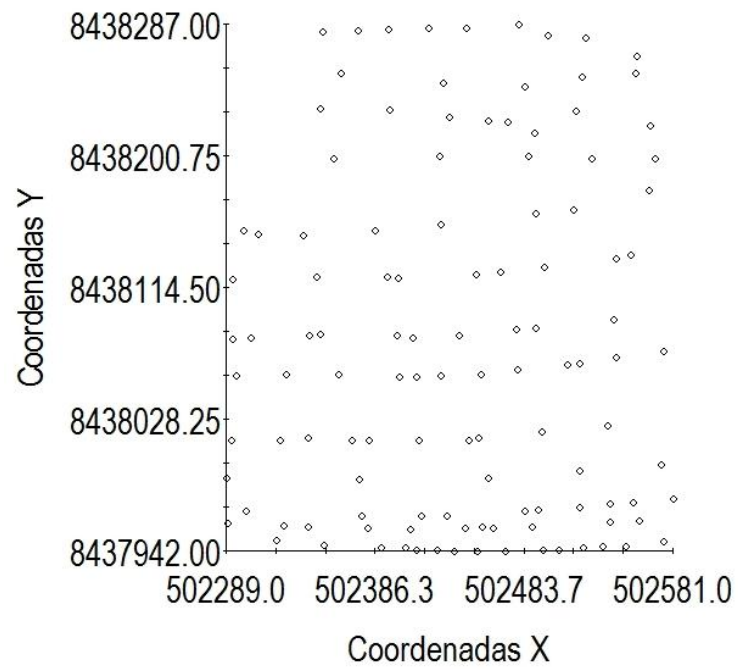


Figura 1. Distribuição dos pontos amostral na área experimental da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso.

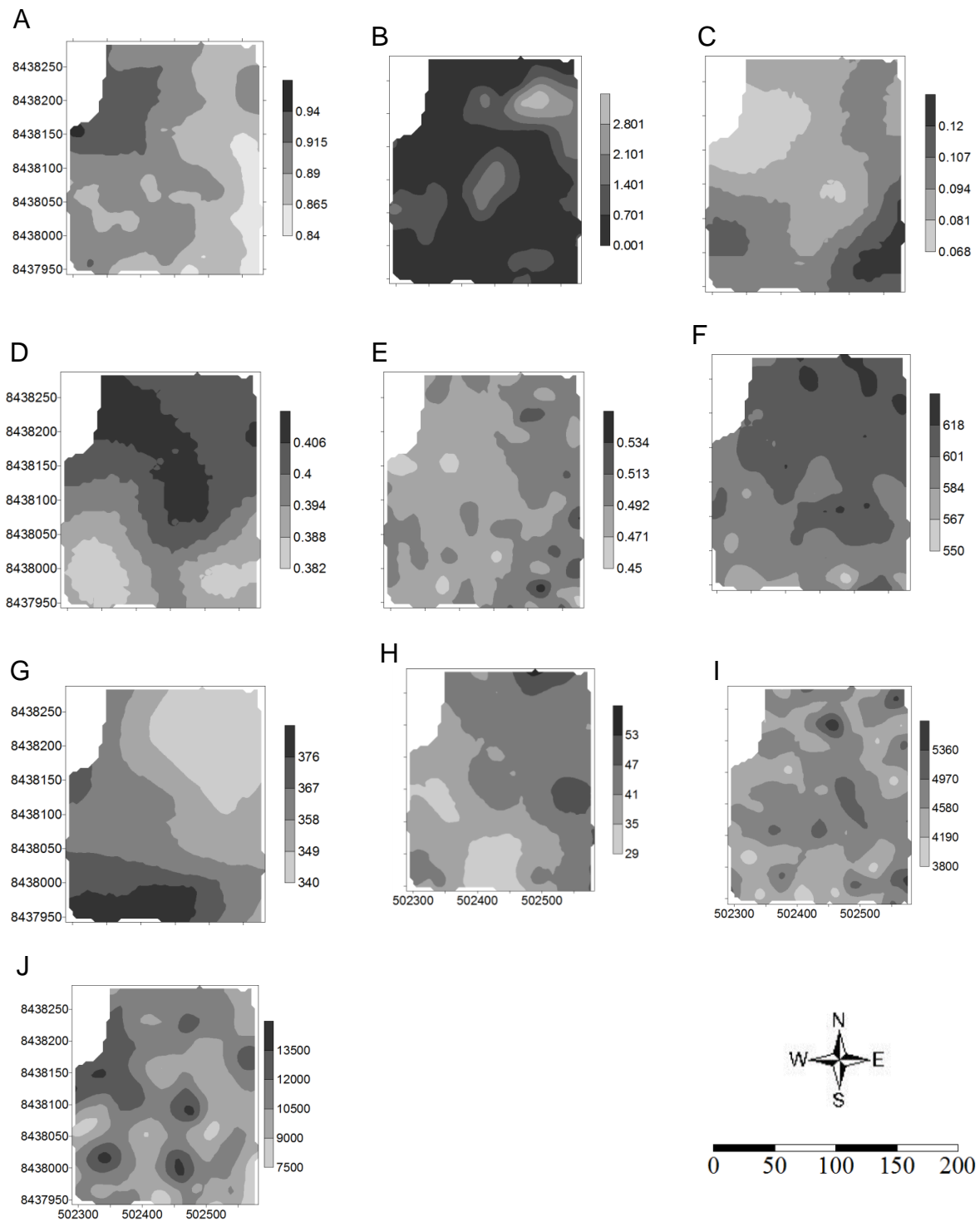


Figura 2. Mapa de variabilidade espacial da densidade relativa (A), condutividade hidráulica saturada (B), macroporosidade (C), microporosidade (D), porosidade total (E), argila (F), areia total (G), silte (H), produtividade de grãos de soja (I) e produtividade de grãos de milho (J) da fazenda Espigão, município de Diamantino, Mato Grosso.

## **A densidade relativa do solo como uma alternativa para determinar unidades de manejo**

[Pesquisa Agropecuária Brasileira]

**Resumo** - Objetivou-se com este estudo auxiliar o potencial de utilização da densidade relativa como delimitador de unidades de manejo em Latossolo Vermelho cultivado em sucessão soja e milho. O estudo foi realizado na Fazenda Espigão localizada no município de Diamantino, Mato Grosso, Brasil (latitudes de 14°07'40" S, longitude de 56°58'39" W e altitude de 539 metros). As amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas em uma área de 9,99 ha na camada de 0-0,20 m, em esquema de amostragem do tipo malha irregular, totalizando 117 pontos de amostragem. Nestes pontos também determinou-se a produtividade de grãos de soja e milho. Após as análises estatísticas, foram definidas quatro unidades de manejo com base na densidade relativa percentual em função da sua média geral. Nessas unidades foram comparadas as médias dos atributos físicos do solo e de produtividade das culturas, como indicadores de manejo. Observou-se que a densidade relativa apresentou potencial para definir unidades de manejo. Nas unidades classificadas com densidade relativa alta e muito alta (maior 0,896) constatou as menores médias de produtividades de grãos de soja e limitações físicas representadas pela macroporosidade e porosidade total. Entretanto, em ambas as unidades, a produtividade de grãos de milho não foi prejudicada.

**Termos para indexação:** compactação do solo, grau de compactação do solo, curva de compactação do solo, geoestatística, agricultura de precisão.

## **The relative density of the soil as an alternative to determine management units**

**Abstract** - The objective of this study help the potential use of relative density as management units delimitter in Oxisol cultivated in succession soybeans and corn. The study was conducted at the Farm Espigão located in the city of

Diamantino, Mato Grosso, Brazil (latitude 14°07'40 " S, longitude 56°58'39 " W and altitude of 539 meters). Samples of disturbed and undisturbed soil were collected in an area of 9,99 ha in the layer of 0-0,20 m, in sampling scheme of irregular mesh type, a total of 117 sampling points. In these points also determined the productivity of soybeans and corn grains. After statistical analysis, were defined four management units based on relative density percentage depending on their overall average. In these units were comparing the soil physical properties and crop productivity, as management indicators. It was observed that has potential to set relative density management units. The units classified as relative density high and very high (above 0,896) were found minors productivity of soybeans and physical limitations represented by the macroporosity and total porosity. However, in both units, the productivity of maize grains was not affected.

**Index terms:** soil compaction, degree of soil compaction, soil compaction curve, geostatistics, precision agriculture.

### Introdução

As ferramentas de agricultura de precisão destacam-se como uma importante alternativa no gerenciamento das atividades agrícolas, uma vez que permite o estudo da variabilidade espacial dos fatores que governam a produção das culturas, sendo de fundamental importância para o planejamento do manejo em sítio específico. Deste modo, reduz-se os efeitos da variabilidade, minimiza-se os impactos ambientais e os custos de produção.

Nesse sentido, a geoestatística é um ramo da estatística comumente utilizada no estudo da espacialização de dados observados, que permite estimá-los em locais não amostrados por meio de técnicas de interpolação e com essas informações é possível reproduzir mapas temáticos que auxiliam nas tomadas de decisões na lavoura (Carvalho et al., 2013). No entanto, os mapas temáticos apresentam um grande número de informações e, isso, pode dificultar a interpretação dos resultados.



Uma nova proposta é sintetizar essas informações e definir unidades de manejo homogêneas (Molin, 2002; Santi et al., 2013) visando o controle localizado das causas que pode ser útil para maximizar o desenvolvimento das plantas cultivadas. Entre os agentes causais capazes de reduzir a produtividade das culturas, a formação de camadas compactadas tem sido um grande problema por correlacionar negativamente com o crescimento das plantas, sobretudo, devido à redução nas trocas gasosas solo-atmosfera, na condutividade hidráulica de água no solo e na disponibilidade adequada de água para as plantas (Hamza & Anderson, 2005; Freddi et al., 2009).

Com isso, um método promissor para avaliar a compactação do solo e determinar nível crítico para desenvolvimento das plantas e modificações físicas no solo é a densidade relativa ( $D_r$ ), obtida pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo através do ensaio de Proctor (Klein, 2006). Por exemplo, Carter (1990) relatam que valor de  $D_r$  acima de 0,86 (dependendo da textura do solo) pode causar a redução da macroporosidade, em consequência o movimento da água no solo, e do desenvolvimento das plantas.

Rosseti et al. (2012) em Latossolo Vermelho de textura argilosa sob sistema plantio direto verificaram que a  $D_r$  crítica para produtividade de grãos de soja foi acima de 0,86. Silva et al. (2014) verificou que  $D_r$  acima de 0,82 diminuiu a altura de planta e acima de 0,87 a matéria seca de plantas de soja em Latossolo Bruno alumínico típico. Freddi et al. (2009) verificaram que o crescimento do sistema radicular e a produtividade de milho correlacionaram negativamente quando a  $D_r$  foi de 0,92 em Latossolo Vermelho.

Nesse contexto, em uma agricultura cada vez mais competitiva e dependente de equipamentos sofisticados, insumos diversos e mais capitais, o monitoramento da variabilidade espacial da compactação do solo é justificável, pois assim é possível sua correção localizada nas áreas de cultivo. Portanto, parte-se da hipótese de que a  $D_r$  pode ser usada para diagnosticar áreas compactadas e definir unidades de manejo homogêneas.

Diante disso, objetivou-se no presente trabalho auxiliar o potencial de utilização da densidade relativa como delimitador de unidades de manejo em Latossolo Vermelho cultivado em sucessão soja e milho.

## Material e métodos

O experimento foi realizado na fazenda Espigão no município Diamantino, Estado de Mato Grosso, localizada na latitude de 14°07'40''S, longitude de 56°58'39'' W, com altitude de 539 metros, no ano agrícola 2013/2014. O município apresenta precipitação anual de 1793 mm com temperatura média anual de 24,97 °C (Souza et al., 2013). Segundo Köppen, o clima da região é classificado como Aw, caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo plano, conforme Santos et al. (2013). A caracterização química e física do solo na camada 0-0,20 m, é apresentada na Tabela 1.

A vegetação original da área em estudo era do tipo floresta tropical subcaducifólio. No ano agrícola 1987/88 fez-se o desmatamento com uso de esteiras e correntes, o qual foi enleirada e queimada. Em seguida o solo foi gradeado na profundidade de 0-0,20 m e no mesmo ano foi semeada a cultura do arroz. Deste período até a safra 1999/2000 cultivou-se soja e milho em sucessão, sendo a adubação realizada na linha de semeadura. Da safra de 2000/01 até a de 2003/04 cultivou-se algodão. De 2004/05 até a de 2013/14 cultivou-se soja e milho em sucessão, sem revolver o solo e o calcário e os fertilizantes passaram a serem aplicados a lanço.

A semeadura mecanizada da soja (*Glycine max* L.) foi realizada em 28 de outubro de 2013 (Cultivar M 7639 RR, ciclo médio 114 dias), sob espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 19 sementes m<sup>-1</sup>, com uma população final de aproximadamente 422 mil plantas por hectares. Adubação por época da semeadura foi realizada a lanço utilizando a técnica da taxa variada, 265 a 280 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 00-32-00 e 150 a 170 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio em cobertura. Já a semeadura do milho (*Zea mays* L.) variedade Penta TL de ciclo de aproximadamente 135 dias ocorreu em 10 de fevereiro de 2014, no espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 2,5 sementes m<sup>-1</sup>, com uma população final de 55.555 plantas por hectares. Adubação por época da semeadura foi realizada a lanço utilizando a técnica da taxa variada, 180 a 200

kg ha<sup>-1</sup> da formulação 00-25-00 e 80 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia em cobertura na fase de quatro folhas desenvolvidas (V4).

A área da pesquisa foi de 9,99 ha e os pontos amostrais foram georreferenciados por meio do sistema de posicionamento por satélites “Glonass”, utilizando o equipamento modelo Topcon Hiper Lite® com a coletora FC200, com erro máximo de 5 mm, em esquema de amostragem do tipo irregular estratificada, isto é, com uma direção definida, totalizando 117 observações (Figura 1).

Em cada ponto foram coletadas amostras de solo do tipo deformadas e indeformadas contemplando a camada de solo de 0-0,20 m, sendo a média da camada intermediária, ou seja, de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. As amostras foram coletadas na entre linha de semeadura na fase florescimento e polinização (R1) da cultura da soja (Ritchie et al., 1977). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de física do solo da Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso (FMAVEZ/UFMT) campus de Cuiabá, MT.

Assim, as amostras deformadas de solo foram coletadas com trado holandês de 0,10 m, as quais foram utilizadas para determinar a granulometria (areia total - AT, argila - AG, silte - SIL) do solo pelo método da pipeta, com agitação lenta por 16 horas para acelerar a dispersão física das partículas (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011).

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de “kopeck”, as quais foram utilizadas para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (0,05 x 0,05 m); microporosidade (MIP) por meio da mesa de tensão Eijkelkamp (caixa de areia) à tensão de 6 KPa, sendo a porosidade total (PT) calculada com base nos valores de densidade de partículas (DP) pontual e macroporosidade (MAP) pela diferença, isto é, MAP = PT - MIP; e a condutividade hidráulica saturada (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011).

Para determinar a curva de compactação do solo com reuso de amostra, foram coletadas aproximadamente 9 kg de solo em trajeto longitudinal dentro da área experimental e sua determinação foi realizada conforme a norma NBR 7182 (Associação de Normas Técnicas, 1986); e seguindo os procedimentos

de preparo e umedecimento do solo, conforme descrito em Ramos et al. (2013).

A curva de compactação foi obtida pelo ajuste dos pares de valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) e densidade do solo ( $DS$ ), ajustada por meio de regressão, conforme a equação polinomial quadrática ( $D_s = y_0 + aU - bU^2$ ) em que “ $y_0$ ,  $b$ ,  $c$ ” foram os coeficientes estimados. Depois desse ajuste, a  $D_r$  para cada ponto amostral foi obtida pela relação entre os valores observados de densidade do solo e a densidade máxima de compactação do solo (Equação 1), de tal forma a obter cada ponto amostral um valor de  $D_r$ , em que quanto mais próximo de 1, mais compactado estará o solo (Klein, 2006).

$$D_r = \frac{DS \text{ kg dm}^{-3}}{DMS \text{ kg dm}^{-3}},$$

sendo  $DS$ : Densidade do solo; e  $DMS$ : Densidade máxima do solo.

A colheita foi realizada manualmente em 07/02/2014 para soja e 04/07/2014 para milho, onde em cada ponto amostral contou-se o número de planta e colheu-se em quatro lineares para soja e dois milho metros lineares para milho. Em seguida, as amostras foram levadas ao laboratório para proceder à debulha manual e obter a massa dos grãos, sendo os dados transformados em  $\text{kg ha}^{-1}$  (14% base úmida).

Todos os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva (mínima, média, máxima, desvio-padrão e coeficiente de variação) através do software Assistat versão 7.5 beta (Silva & Azevedo, 2009). Em seguida, foram analisadas quanto à dependência espacial. O ajuste do semivariograma foi realizado utilizando-se os parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ), o alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C$ ). Os critérios para ajuste e seleção do melhor modelo foram: a) menor soma de quadrados de resíduos (SQR) e, b) maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A decisão final do modelo que representou o melhor ajuste foi realizada pela validação cruzada, utilizando o *Gamma Design Software* ( $GS^+$ ) (Robertson, 2008).

Quando verificada a dependência espacial dos dados fez-se a interpolação através da krigagem em grid de 5 x 5 m, assim, todos os modelos em análise

tiveram os mesmos números de linha e colunas correspondentes, utilizando o GS<sup>+</sup> (Robertson, 2008).

Os dados da Dr obtidos da Krigagem foram transformados em dados percentuais em relação à média geral da área, conforme a Equação 3. Foi proposto quatro níveis de compactação, os quais representam as seguintes unidades de manejo: < 95% = nível baixo; 95% - 100% = médio; 100% - 105% alto e > 105% = muito alto. Com as unidades de manejo definida, foi possível conhecer os valores reais da Dr, pois estes apresentavam a mesma localização espacial dos dados expressão em porcentagem, assim, com esses dados realizou-se o mapa de unidade de manejo utilizando o *software* ArcGis® 9.0. Esta metodologia foi modificada de Molin (2002), para definir unidade de manejo com base na produtividade média obtida em diferentes safras. Para tanto, recomenda-se que essa classificação seja feita apenas se os dados apresentarem coeficiente de variação menor que 30%.

$$Dr\% = \frac{MG}{VCC} \times 100,$$

em que: Dr% é densidade relativa expressa em porcentagem; MG é Média geral da densidade relativa na área; e VCC é Valor da densidade relativa em cada célula.

Com o mapa de unidades de manejo definida, realizou-se a sobreposição dos mapas dos atributos físicos do solo e da produtividade de soja e milho com objetivo de conhecer os valores de cada variável nas respectivas unidade de manejo, utilizando o *software* ArcGis® 9.0. Em seguida, esses dados foram comparados entre as unidades de manejo pelo teste t de *Student* ( $P < 0,05$ ) por meio do *software* SPSS v. 20.

## Resultados e discussão

Os indicadores físicos do solo e de produtividade grãos de soja e milho teve comportamento diferente nas unidades de manejo com Dr alta e muito alta (Dr alta 0,896 – 0,939 e Dr muito alta > 0,940), mostrando desta forma que a Dr pode ser uma alternativa para identificar áreas prioritárias para o manejo

localizado. Na Figura 2 são apresentadas as unidades de manejo definida por meio da Dr%.

Nota-se que a maior abrangência do mapa foi com Dr média e alta as quais representaram 51,22 e 47,82% da área do mapa, respectivamente. A Dr aumentou no sentido sudeste para oeste, evidenciando que o mapa de unidades de manejo é importante para visualizar de forma mais clara o comportamento desse atributo na área. De acordo com Rosa et. al. (2011) a compactação do solo em plantio direto está relacionada às pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas na área, aumentando a densidade do solo, a resistência do solo a penetração e reduzindo a macroporosidade.

A comparação de média pelo Teste t *student* para os atributos físicos do solo e de produtividade grãos entre as unidades de manejo é apresentada na Tabela 2 e 3, respectivamente.

Verificou-se que alguns indicadores físicos do solo e de produtividade grãos de soja e milho difere estatisticamente nas unidades de manejo com Dr alta e muito alta (Dr alta 0,896 – 0,939 e Dr muito alta 940 – 0,945), mostrando desta forma que a Dr pode ser uma alternativa para identificar áreas prioritárias para o manejo localizado.

Nota-se que PGS na unidade 1 e 2 difere estatisticamente das unidades 3 e 4 (Tabela 2). Estes resultados estão de acordo com os verificados Rossetti et al. (2012) avaliando Dr em sistema plantio direto sob Latossolo Vermelho na camada de solo 0-0,10 e 0,10-0,20 m que Dr acima de 0,86 causa decréscimo na produtividade de soja. Nesse estudo, a produtividade reduziu significativamente com  $Dr > 0,896$ .

As menores produtividades de grãos de soja nas unidades com alta e muito Dr pode estar relacionado com a dificuldade de aeração das raízes e redução da água disponível para as plantas, uma vez verificou-se diferença significativamente para MAP entre as unidades de manejo (Tabela 3).

Verificou-se que as unidades de manejo 3 e 4 reduziu significativamente a Ko, quando comparada com as unidades 1 e 2, corroborando com os resultados de Carter (1990) que valores de Dr superiores a 0,86 (Dr alta e muito alta) provocam redução na macroporosidade, prejudicando o movimento

da água no solo e desenvolvimento das culturas, refletindo em menores produtividade conforme observado nesse estudo, a qual reduziu com  $D_r > 0,896$ . Tal fato pode ter ocorrido, pois o movimento de fluidos no solo diminui quando os valores de macroporosidade são menores que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , conforme verificado por Vomocil & Flocker (1966).

Observa-se diferença estatística para MIP apenas para unidade manejo 3, isto é, com  $D_r$  muito alta, com tendência aumentar a medida que aumentou o grau de compactação do solo. Silva et al. (2006), trabalhando com atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo, encontrou incremento da microporosidade com a compactação proporcionado pela redução do espaço poroso e aumento da retenção de água no solo nas tensões de 0,01 e 1,5 MPa. Porém, segundo esses autores, este aumento não se expressou em termos de conteúdo de água disponível no solo, o que pode comprometer o desenvolvimento das plantas.

Para PGM nota-se que a unidade de manejo 4 com  $D_r$  muita (0,940 – 0,945) registou as maiores produtividades de grãos, diferindo estatisticamente das demais unidades de manejo, ao contrário do observado para produtividade soja. Uma possível explicação é que o aumento da  $D_r$  na área favoreceu maior contato solo-raiz da planta favorecendo absorção de água e nutriente. Este resultados difere dos verificados por Freddi et al. (2009) verificou que o crescimento do sistema radicular do milho e a produtividade foram prejudicados quando a  $D_r$  atingiu valores maiores que 0,92 em Latossolo Vermelho.

A PT diferiu entre as unidades de manejo, com tendência a diminuir com aumento da  $D_r$ , isso sugere que a PT é um atributo do solo muito sensível as variações da  $D_r$  (grau de compactação), corroborando com os verificado por Viana et al. (2011), segundo esses autores a porosidade total é caracterizada pela redução da macroporosidade conforme também verificado nesse estudo.

Com relação às frações granulométricas, nota-se que AG e AT difere estatisticamente apenas na unidade manejo 1 e 2 ( $D_r$  baixa e média). Ao contrário do SIL. No geral, verificou-se que as áreas de manejo com  $D_r$  alta e muito alta ( $D_r$  0,896 – 0,945) reduziu significativa  $K_o$  e PGS. Os principais indicadores de compactação (MAP; MIP e PT) diferiram estaticamente na unidade manejo com  $D_r$  muito alta ( $D_r$  0,940 – 0,945), entretanto, registrou os

maiores valores de PGM. Assim, em uma área onde são cultivadas culturas que respondem de forma diferentes a compactação do solo é necessário um estudo financeiro para decidir se são viáveis práticas de manejo do solo que alivie a sua compactação.

### **Conclusões**

1. A Dr foi eficiente para definir unidades de manejo, uma vez que os dados de atributos físicos do solo e de produtividade de grãos diferenciaram significativamente entre as unidades investigadas;
2. As unidades de manejo 1 e 2 classificadas com  $Dr > 0,896$  reduziu significativamente a  $K_0$  e PGS, já a MAP; MIP e PT na unidade de manejo 4 com  $Dr 0,940 - 0,945$  diferiu estatisticamente das demais . Para cultura do milho não foi possível identificar um valor crítico, uma vez que não reduziu sua produtividade.

### **Agradecimentos**

Ao Fundo de Apoio Cultura da Soja (FACs) em parceria com a Associação dos Produtores de Soja de Mato Grosso (APROSOJA) pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro autor. Aos colaboradores do Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade do Estado de Mato Grosso (FAMEVZ), por ceder o espaço físico para realização da pesquisa e a Fazenda Espigão pela concessão da área experimental.

### **Referências**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine Sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.



CARVALHO, L.C.C.; SILVA, F. M. da; FERRAZ, G.A.S.; SILVA, F.C. da; STRACIERI, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v.8, p.265-275, 2013.

EMPRESA SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225p.

FERREIRA, P.V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991. 437p.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.805-812, 2009.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.5, p.26-32, 2006.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.83-92, 2002.

RAMOS, F.T.; RAMOS, D.T.; MAIA, J.C.S.; SERAFIM, M.; AZEVEDO, E.C. de; ROQUE, M.W. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: Com e sem reuso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.129-136, 2013.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSON, H.E.; BENSON, G.O. How a soybean plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology. **Cooperative Extension Service**, 1977. 20p. Special report.

ROBERTSON, G.P. **GeoStatistics for the environmental sciences**: Gamma Design Software, Plainwell: Michigan USA, 2008. 71p.

ROSA, D.P. da; REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; BARROS, C.A.P.; REINERT, D.J. VIEIRA, D.A. Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.1199-1205, 2011.

ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, P.R. de; ANDRIOLI, I. Atributos Físicos nos Tempos de Adoção de Manejos em Latossolo Cultivado com Soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.367-376, 2012.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.; EITELWEIN, M.T.; CHERUBIN, M.R.; SILVA, R.F. da; ROS, C.O. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, p. 510-515, 2013.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação do solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V de. Principal componets analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESSO N COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 2009, Reno. **Annals ... American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2009. p.409-711.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente**, v.10, p.842-847, 2006.

SILVA, F.R. da; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1731-1739, 2014.

SOUZA, A.P.; MOTA, L.L.; ZAMADEI, T.; MARTIN, C.C.; ALMEIDA, F.T.; PAULINO, J. **Classificação climática e balanço hídrico climático no Estado de Mato Grosso**, v.1, p.34-43, 2013.

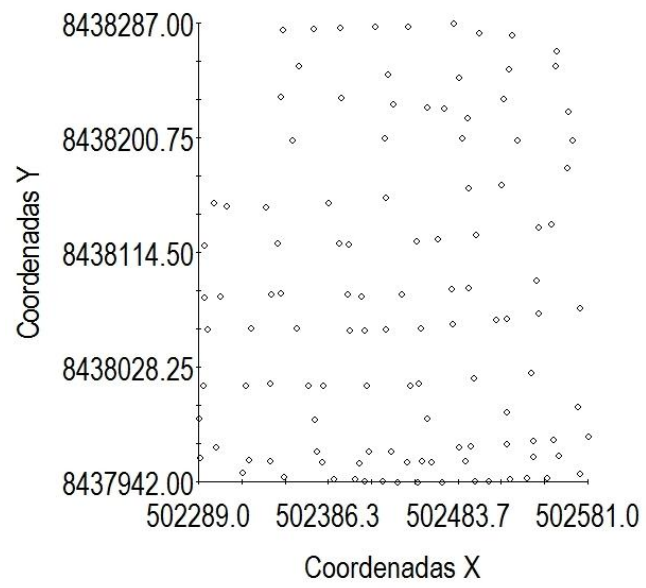
VIANA, E.T.; BATISTA, M.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.C. da; INOUE, T.T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2105-2114, 2011.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 4, p.242-246, 1966.

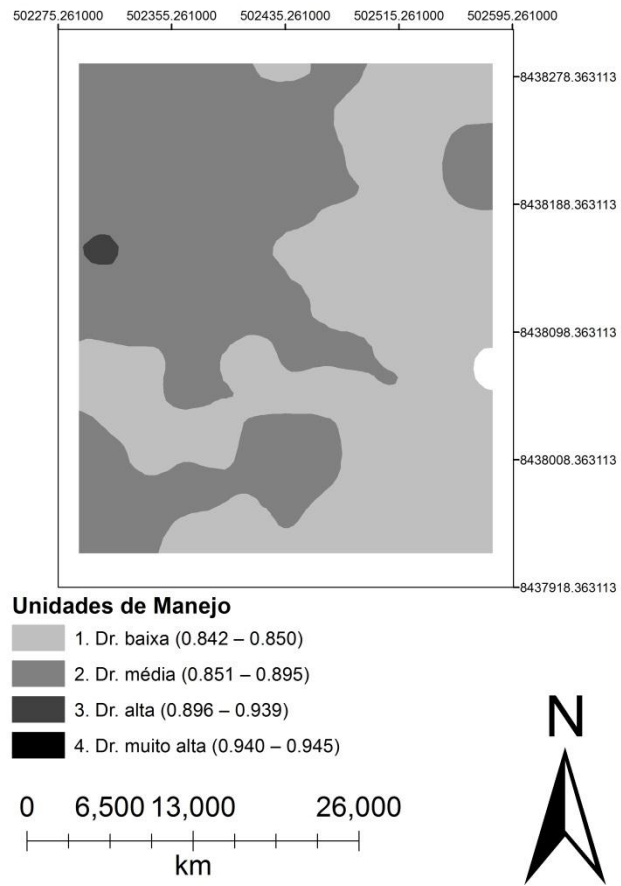
**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da fazenda Espigão, município de Diamantino, MT, Brasil.

Camada (m)	pH água	P	K	Ca	Mg	Al	H	MOS	AT	AG	ST	DP
		mg dm <sup>-3</sup>				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		g dm <sup>-3</sup>		----- g kg <sup>-1</sup> -----		Mg dm <sup>-3</sup>
0,0-0,20	5,7	11,05	36	2,9	1,1	0,0	4,9	37,35	360,5	598,5	40	2,45

P, fosforo; K, potássio; Ca, cálcio; Mg, magnésio; Al, alumínio; H, hidrogênio; MOS, matéria orgânica do solo; AT, areia total; AG, argila; ST, silte; e DP, densidade de partícula



**Figura 1.** Distribuição dos pontos amostral na área experimental da Espigão, município de Diamantino, MT, Brasil.



**Figura 2.** Mapa de unidade de manejo com base no valor percentual da densidade relativa do solo da fazenda Espigão, município de Diamantino, MT, Brasil.

**Tabela 2.** Teste t *student* para a produtividade de grão de soja (PGS) e milho (PGM) entre as unidades de manejo (UM) definidas a partir da densidade relativa do solo expressa em porcentagem da fazenda Espigão, município de Diamantino, MT, Brasil.

UM	PGS kg ha <sup>-1</sup>	PGM kg ha <sup>-1</sup>
1	4.895,304±55,939a	9.628,552±132,587a
2	4.650,109±240,490a	10.439,260±1.051,936a
3	4.605,942±209,593b	11.481,525±976,637c
4	4.357,643±91,891b	13.251,201±162,619d
Média	4.627,25	11.200,13
CV%	4,12	12,09

1, Dr baixa (0,842 - 0,850); 2, Dr média (0,851 - 0,895); 3, Dr alta (0,896 < Dr ≤ 0,939); e 4, Dr muito alta Dr (0,940 – 0,945). Médias seguidas da mesma letra na coluna são iguais ao nível de 5% (p < 0,05) de probabilidade de erro.

**Tabela 3.** Teste t *student* para os atributos físicos do solo da camada de 0,0-0,20 m entre nas unidades de manejo (UM) definidas a partir da densidade relativa do solo expressa em porcentagem da fazenda Espigão, município de Diamantino, MT, Brasil.

UM	Atributos físicos do solo						
	Ko cm h <sup>-1</sup>	MAP	MIP	PT	AG	AT	SIL
		.....m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .....			..... g kg <sup>-1</sup> .....		
1	0,736±0,040a	0,120±0,002a	0,393±0,001a	0,524±0,007a	598,587±0,867a	353,740±0,420a	46,952±0,427a
2	0,745±0,646a	0,101±0,011b	0,397±0,007a	0,497±0,009b	602,534±10,987b	356,789±11,520b	41,964±4,632a
3	0,471±0,490b	0,086±0,010c	0,401±0,007a	0,483±0,007c	601,865±9,431bc	361,816±9,855c	40,119±3,654b
4	0,484±0,252b	0,072±0,001d	0,403±0,001b	0,461±0,004d	590,287±3,750c	369,746±0,787c	36,255±0,603c
Média	0,61	0,10	0,40	0,49	598,32	360,53	41,32
CV%	22,15	18,98	1,09	4,56	0,81	1,68	9,31

1, Dr baixa (0,842 - 0,850); 2, Dr média (0,851 - 0,895); 3, Dr alta (0,896 < Dr ≤ 0,939); 4, Dr muito alta Dr (0,940 – 0,945), Ko, condutividade hidráulica saturada; MAP, macroporosidade; MIP, Microporosidade; PT, porosidade total; AR, argila; AT, areia total; e SIL, silte. Médias seguidas da mesma letra na coluna são iguais ao nível de 5% (p < 0,05) de probabilidade de erro.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos físico-hídricos do solo e da produtividade de grãos sob cultivo mínimo ao longo de 12 anos apresentou dependência espacial e o modelo esférico foi o mais comum entre as variáveis em estudo.

Houve correlação negativa e positiva entre os mapas de densidade relativa e os atributos físicos do solo e da produtividade de grãos, sendo que a macroporosidade e porosidade total foram as variáveis que apresentaram maior correlação, assim, podem ser utilizadas para estimar a densidade relativa na sua impossibilidade.

Foi possível, por meio da densidade relativa, definir quatro unidade de manejo com baixo, médio, alto e muito alto grau de compactação do solo, uma vez que as variáveis em estudo diferem entre as áreas de manejo.

O grau de compactação em que os atributos físicos do solo e da produtividade de grão diferenciam entre si foi acima na unidade de manejo com Densidade relativa alta e muito alta, isto é, maior que 0,84, com exceção, para produtividade de grãos de milho, indicando que o grau de compactação do solo para as condições em estudo não foi prejudicial para seu desenvolvimento. A PT foi o atributo do solo mais sensível às elevações de compactação na área.

Com o resultado desse estudo, conclui-se que a densidade relativa pode ser utilizada para diagnosticar e definir subáreas com diferentes graus de compactação, e por meio dos mapas distribuição espaciais e unidades de manejo pode auxiliar no manejo do solo sustentável, isto é, realizar o manejo em sitio-específico minimizando os custos de produção e impacto ambiental com o intuito de manter a área mais homogênea possível.