

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

GABRIEL MARQUES PEDROSA

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA RELAÇÃO
COM A PRODUTIVIDADE DO SORGO

UBERLÂNDIA
2021

GABRIEL MARQUES PEDROSA

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA RELAÇÃO
COM A PRODUTIVIDADE DO SORGO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Agronomia, da Universidade Federal de
Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado

UBERLÂNDIA
2021

GABRIEL MARQUES PEDROSA

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA RELAÇÃO
COM A PRODUTIVIDADE DO SORGO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Agronomia, da Universidade Federal de
Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Uberlândia, 24 maio 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado (UFU)

Prof^a. Dr^a. Araújo Hulmann Batista (UFU)

Eng. Agrônomo Ígor Araújo Menezes de Ávila (P&D Sensix Ag)

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, que são os grandes responsáveis pela minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom do conhecimento, saúde física e mental; por ter me proporcionado bênçãos em forma de oportunidades, para que eu pudesse aprender sobre a natureza, entender e trabalhar com um pouco da sua criação na Terra em prol de grandes benefícios e no alcance de grandes conquistas.

Aos meus pais, Jales e Suzia, pela paciência, apoio, carinho, amor e dedicação durante toda minha vida, a fim de me proporcionar o que há de melhor para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Além de serem a base fundamental das minhas decisões e nas realizações dos meus sonhos.

Ao meu professor e orientador Sandro Carmelino Hurtado, por me proporcionar a oportunidade de trabalhar com ele no desenvolvimento desse e demais projetos, em constante apoio e suporte técnico, bem como no exemplo de profissionalismo e liderança, na missão de contribuir com o progresso científico brasileiro.

Ao Grupo de Estudos em Agricultura de Precisão (GeAP), juntamente com meus colegas de profissão, que me auxiliaram grandemente na execução deste trabalho e contribuíram para minha formação acadêmica e desenvolvimento nesta área.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), por me transmitirem todo conhecimento acadêmico e prático voltado às ciências agrárias e pela contribuição grandiosa em toda a minha formação profissional.

O conhecimento é o bem maior do Homem e sua busca deve ser constante e incessável. (PEDROSA, G. M., 2021)

RESUMO

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma alternativa interessante para o cultivo em sucessão (segunda safra), que apresenta características semelhantes ao milho (*Zea mays*) e algumas vantagens produtivas como tolerância ao déficit hídrico, temperaturas elevadas, e tolerância média a acidez do solo. Entretanto, fatores como baixa fertilidade e compactação podem afetar significativamente seu potencial produtivo, sendo fundamental o conhecimento das características físicas do solo e seu comportamento espacial para execução do manejo adequado. A agricultura de precisão é a ferramenta que permite realizar o estudo mais complexo de uma área por meio da geoestatística. Este trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, densidade e porosidade total, a fim de estabelecer uma correlação com os dados de produtividade da cultura do sorgo. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Capim Branco da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizada no município de Uberlândia - MG (18°53' S e 48°20' W). A área experimental compreende 25 hectares a uma altitude média de 830 m com um relevo suavemente ondulado. Os dados de produtividade do sorgo foram coletados na segunda safra de 2018 e as avaliações físicas para obtenção da densidade e porosidade total (microporos e macroporos) foram realizadas por meio de amostragem indeformada, nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m, com o auxílio de uma grade amostral sistematizada de 2 pontos por hectare, totalizando 50 pontos georreferenciados. A análise estatística dos dados obtidos apresentou valores médios de densidade de solo elevados e de porosidade total abaixo do ideal, com alto coeficiente de variação da macroporosidade e da fração silte. Os testes de correlação apresentaram significância entre a maioria dos atributos físicos analisados e com a produtividade do sorgo. Os semivariogramas foram ajustados nos modelos exponencial, esférico e gaussiano, permitindo a interpolação dos dados para geração de mapas de contorno. Sendo assim, foi possível identificar uma região problemática, mais adensada, onde verificou-se menores valores de produtividade da cultura, evidenciando correlações negativas da produtividade do sorgo com a densidade do solo e positivas com a porosidade total. Portanto, áreas adensadas e com baixa porcentagem de poros reduzem a expressão do potencial produtivo da cultura do sorgo.

Palavras-Chave: Agricultura de Precisão. Geoestatística. Densidade do solo.

ABSTRACT

Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is an interesting alternative for growing in succession (second crop). It has characteristics similar to corn (*Zea mays*) and some productive advantages such as tolerance to water deficit, high temperatures, and medium tolerance to soil acidity. However, factors such as low fertility and compaction can significantly affect its productive potential. So, it is essential to know the physical characteristics of the soil and its spatial behavior to perform the proper management. Precision agriculture is the tool that allows to carry out the most complex study of an area through geostatistics. This work aimed to analyze the spatial variability of the physical attributes of the soil, density and total porosity, in order to establish a correlation with the productivity data of the sorghum crop. The sorghum productivity data were collected in the second harvest of 2018. The evaluations of the physical attributes to obtaining density and total porosity (micropores and macropores) were carried out by means of undeformed sampling. The analyzed depths were 0 - 0.2 m and 0.2 - 0.4 m, with the aid of a systematic sampling grid of 2 points per hectare, totaling 50 georeferenced points. The descriptive analysis of the data obtained showed average values of high soil density and total porosity below the ideal. Macroporosity and the silt fraction presented a high coefficient of variation. The correlation tests showed significance between most of the physical attributes analyzed and with the productivity of sorghum. The semivariograms were adjusted in the exponential, spherical and gaussian models, allowing the interpolation of the data to generate contour maps. Thus, it was possible to identify a problematic region, denser, where there were lower values of crop productivity, showing negative correlations between sorghum productivity and soil density and positive correlations with total porosity. Therefore, dense areas with a low percentage of pores reduce the expression of the productive potential of the sorghum crop.

Keywords: Precision Agriculture. Geoestatistics. Soil density.

LISTA DE IMAGENS

FIGURA 1	Área de estudo e distribuição dos 50 pontos georreferenciados	14
FIGURA 2	Amostragem de solo indeformada da área experimental, nas profundidades de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m	15
FIGURA 3	Amostras de solo no anel de Kopec depois de realizado a toaleta (A e B)	16
FIGURA 4	Amostras sobrepostas na bandeja sobre lâmina de água de 1 cm com ascensão capilar (A) e amostras sob água até a borda depois da ascensão capilar (B)	17
FIGURA 5	Modelos de semivariogramas utilizados para interpolação dos mapas de contorno de cada atributo físico do solo e da produtividade do sorgo	24
FIGURA 6	Mapas de contorno interpolados por meio do método de krigagem da área experimental para todos os atributos físicos avaliados e produtividade do sorgo	25
FIGURA 7	Mapa de contorno da área experimental da Faz. Capim Branco (UFU) com os valores de RP na profundidade de 0 – 0,4 m	26

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Análise descritiva dos atributos físicos do solo nas camadas de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m e da produtividade do sorgo, referentes à área experimental. Uberlândia, 2019	19
TABELA 2	Coefficientes de correlação de <i>Pearson</i> (ρ) entre os atributos físicos do solo analisados e a produtividade do sorgo. Uberlândia, 2019	21
TABELA 3	Parâmetros dos semivariogramas para os atributos físicos do solo analisados e produtividade do sorgo. Uberlândia, 2021	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ao	Alcance
Aop	Alcance prático
Co	Efeito pepita
Co + C	Patamar
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CV	Coefficiente de Variação
Ds	Densidade de solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa
EPP	Efeito pepita puro
GDE	Grau de dependência espacial
LAMAS	Laboratório de Manejo de Solos
MaP	Macroporos
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MiP	Microporos
Pd	Peso drenado
PT	Porosidade total
Psat	Peso saturado
Pseco	Peso seco
RP	Resistência à penetração
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volume

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
	1.1 <i>Cultura do sorgo</i>	13
	1.2 <i>Densidade de solo e porosidade</i>	13
	1.3 <i>Agricultura de precisão</i>	14
2	MATERIAIS E MÉTODOS	15
	2.1 <i>Localidade e amostragem</i>	15
	2.2 <i>Obtenção dos dados laboratoriais</i>	17
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
	3.1 <i>Análise descritiva</i>	20
	3.2 <i>Análise da variabilidade espacial</i>	24
4	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 Cultura do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) apresentou nos últimos 10 anos, um aumento de mais de 38% em sua produção total no Brasil, segundo dados da CONAB. Apesar da menor área plantada do cereal (875 mil hectares), quando comparado aos 19 e 38 milhões de hectares para o milho e soja, respectivamente, o sorgo contribui com produtividade próxima à 3000 kg/ha (CONAB, 2020). Ademais, os grãos de sorgo representam cerca de 90 % do peso dos grãos de milho e 84% do seu cultivo ocorre em segunda safra, sendo uma alternativa interessante para sucessão de culturas.

O sorgo é uma gramínea de origem africana, com características agronômicas e nutricionais semelhantes ao milho (*Zea mays*). A semelhança morfológica com o milho é importante para avaliar a interação da cultura com os atributos físicos, químicos e hídricos do solo. Existem ainda os tipos de sorgo granífero, forrageiro, silageiro, vassoura e sacarino, que podem ser utilizados na alimentação humana e animal, principalmente na produção de forragem e formulação de rações. Segundo Tesini (2003), o sorgo granífero constitui basicamente um ingrediente na fabricação de rações para alimentação de aves, suínos e bovinos, além de ser o que possui maior área de cultivo entre os tipos de sorgo.

A cultura do sorgo é tolerante ao déficit hídrico e a temperaturas elevadas e tolerância média para acidez do solo, o que desperta o interesse em muitos agricultores. Apresenta ciclo vegetativo curto (90 a 120 dias), ideal para cultivo fora de época em sucessão a cana-de-açúcar, milho ou soja (SILVA et al., 2019). Entretanto, fatores como compactação, baixa fertilidade dos solos e sementes de baixa qualidade dificultam a expressão do potencial produtivo da cultura (RODRIGUES FILHO et al. 2006).

1.2 Densidade de solo e porosidade

O solo em seu estado natural, sob vegetação nativa, de forma geral tem a densidade, porosidade, agregação e permeabilidade adequadas ao desenvolvimento vegetal (LLANILLO et al., 2006). As áreas de cultivo possuem superfície contínua bastante heterogênea e apresentam variabilidade espacial em relação aos seus atributos em uma determinada área ou região. Quando o solo é submetido à ação antrópica sofre alterações diversas que podem limitar a produtividade das culturas pela perda da qualidade estrutural (BERTOL et al., 2001). Segundo

Sanchez (2005), os atributos físicos do solo como textura e densidade do solo são bons indicadores de qualidade em um sistema agrícola. Esses fatores inferem significativamente na produção das lavouras e na determinação do manejo da área (SILVA et al., 2011).

A densidade do solo é entendida como a relação entre a massa de partículas sólidas e o volume de solo seco e assume valores que variam de 0,90 a 1,80 kg/dm³ (EFFGEN et al., 2006). De acordo a esses autores a porosidade total do solo é inversa à sua densidade e compreende o volume de vazios, microporos e macroporos. É determinada pela densidade e teor de matéria orgânica e possui valores médios de 0,3 a 0,6 m³/m³. Solos compactados apresentam densidade elevada, enquanto os solos bem estruturados e ricos em matéria orgânica possuem densidade menor (SCARDUA et al., 1986). Para alguns autores como Braida et al. (2006) e Libardi (2005), o aumento de matéria orgânica no solo é fator inverso à sua densidade, seja pelo equilíbrio na estruturação do solo e/ou pela baixa densidade do material orgânico.

O intenso uso de implementos agrícolas no cultivo do sorgo possui efeito cumulativo no que se diz respeito ao aumento da compactação do solo, sendo uma das principais consequências do manejo inadequado do solo (ALVARENGA et al., 1987). Podem reduzir a macroporosidade, atividade biológica, retenção de água e aeração, ao mesmo tempo que aumentam sua densidade e impedem o desenvolvimento radicular das plantas (FREDDI, 2008; JIMENEZ, 2007; MARANHÃO et al., 2011). Portanto, nos sistemas produtivos, devem ser consideradas a avaliação da densidade e porosidade do solo, bem como sua resistência à penetração e distribuição de agregados em tamanho e estabilidade (CARNEIRO, 2009; TAVARES FILHO; RIBON, 2008).

1.3 Agricultura de precisão

As propriedades físico-hídricas do solo apresentam variações de continuidade ou dependência espacial, oriundas dos diferentes tipos de manejo e da própria natureza do solo (JOAQUIM JUNIOR, 2002). De acordo com Bertoli et al. (2004), tais variações são mais intensas nos sistemas convencionais do que em conservacionistas e influem no acúmulo de matéria orgânica, erosão e infiltração da água no solo. Trabalhos que avaliam a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (CARVALHO et al., 2010) são uteis na identificação de zonas homogêneas, para um tratamento específico. Isso torna fundamental o mapeamento de áreas agrícolas para adoção de manejo adequado e implementação de uma agricultura sustentável (ANDREOTTI et al., 2010).

Segundo Vieira (2000), a análise da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo pode ser realizada por meio da estatística descritiva, mas nesse caso não é possível a determinação da dependência espacial dos dados amostrais. Em áreas heterogêneas se faz uso da geoestatística que permite a representação quantitativa da variação de um atributo na superfície do solo e a estimativa de valores não amostrados sem tendência e com o mínimo de variância.

A agricultura de precisão, é entendida como um “conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando ao aumento de retorno econômico e à redução do impacto ambiental” (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA, 2013). Permite assim, detectar a existência das variações e a distribuição espacial das medidas estudadas, por meio da geoestatística. Esta ciência requer um planejamento na coleta de amostras, fundamentado na localização espacial de cada ponto amostrado e na determinação de zonas específicas de manejo, no estudo de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, a fim de facilitar as operações agrícolas e favorecer o desenvolvimento vegetal (DALCHIAVON et al., 2013; REICHERT et al., 2008).

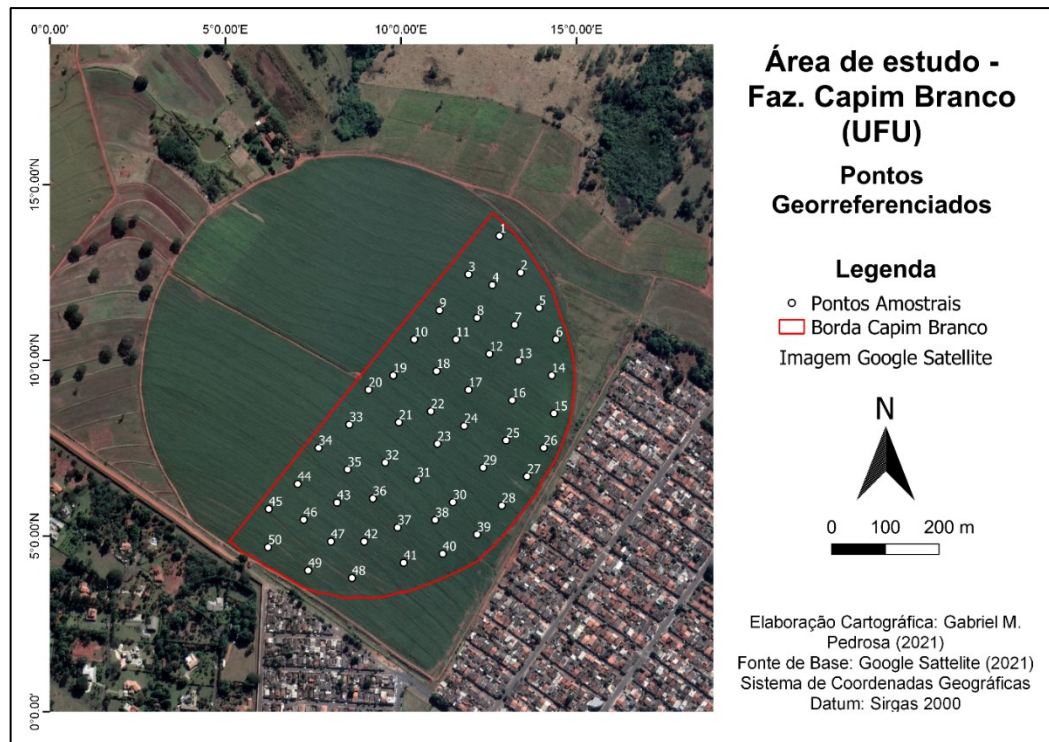
Dessa maneira, o objetivo proposto com o presente trabalho foi analisar a variabilidade espacial da densidade do solo e porosidade total (microporos e macroporos), a fim de estabelecer relações espaciais com os dados de produtividade da cultura do sorgo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localidade e amostragem

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Capim Branco da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizada no município de Uberlândia - MG (18°53' S e 48°20' W). A área experimental compreende 25 hectares e uma altitude média de 830 metros, temperatura média de 21,5 °C e pluviosidade média anual de 1.479 milímetros. De acordo com a classificação da EMBRAPA (2013) o solo é o Latossolo Vermelho, apresenta textura média argilosa e classe franco-argiloso-arenoso. O relevo da área é suavemente ondulado, e o clima tipo Aw segundo classificação de Köppen. Na área foram georreferenciados para avaliações 50 pontos dispostos em numa grade amostral de 2 pontos por hectare, sistematicamente aleatorizada e espaçados em média 75 m (Figura 1).

Figura 1 – Área de estudo e distribuição dos 50 pontos georreferenciados.



Fonte: O autor.

O sorgo avaliado foi semeado em março de 2018, em segunda safra, com população de 220 mil sementes por hectare. As parcelas amostrais em cada ponto georreferenciado consistiram em uma área de 10m² (2m x 5m). A colheita das parcelas foi realizada em julho do mesmo ano, de forma manual, seguida de trilha mecanizada, limpeza de impurezas, pesagem, obtenção de umidade dos grãos e estimativa da produtividade do sorgo, a 13 % de umidade.

A coleta do solo para análise da densidade e porosidade foi realizada em março de 2019, pelo método da amostragem indeformada e auxílio do GPS E-Trex Vista® GARMIN, para localização dos pontos georreferenciados. Em cada ponto foram coletadas duas amostras, nas profundidades de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m (Figura 2), com auxílio de picareta e enxadão, régua para medição das profundidades desejadas, anéis de Kopec e cravador de anel para a obtenção do solo indeformado, estilete e faca na retirada dos anéis, telas de tecido fino e ligas de borracha para assegurar o solo no anel, a fim de evitar perdas de amostra. Totalizaram-se então 100 amostras para análise laboratorial.

Figura 1 – Amostragem de solo indeformada nas profundidades de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m.



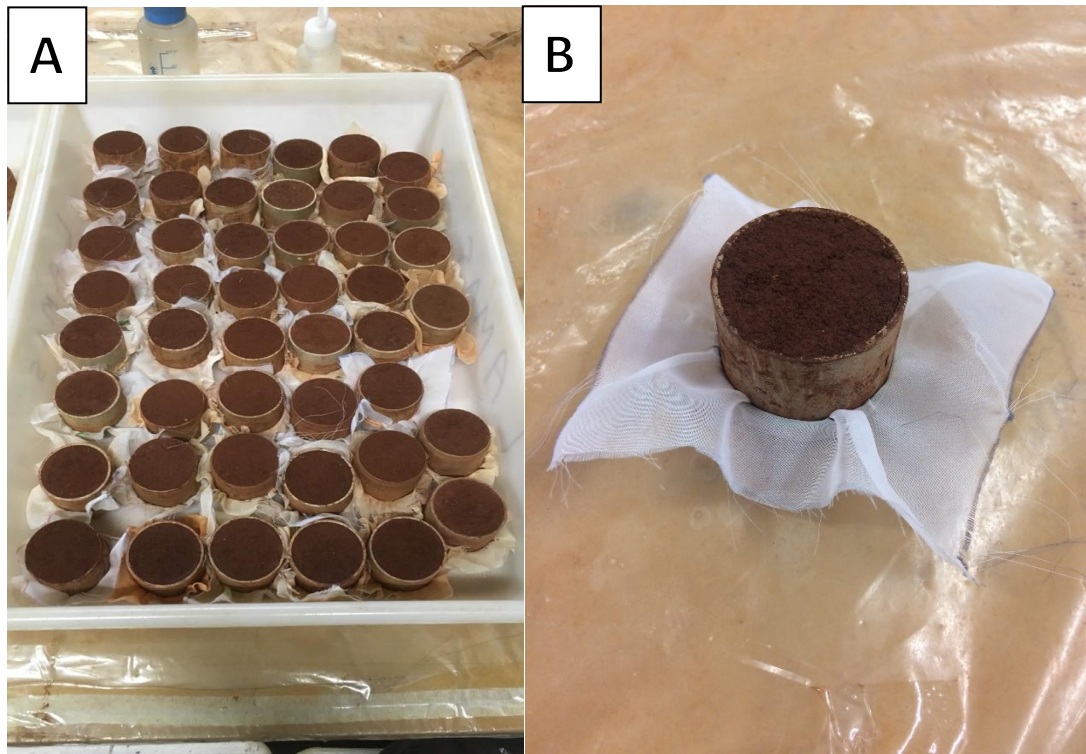
Fonte: O autor.

2.2 Obtenção dos dados laboratoriais

Após a etapa de campo, as amostras indeformadas foram levadas para o Laboratório de Manejo de solos da UFU (LAMAS), a fim de obter os dados de densidade e porosidade. Todos os procedimentos realizados foram fundamentados no Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (EMBRAPA, 2017).

Foi realizado toailete dos anéis, com intuito de remover o excesso de terra das extremidades e cuidados para não destorroar (Figura 3).

Figura 3 – Amostras de solo no anel de Kopec depois de realizado a toalete.



Fonte: O autor.

Para a obtenção do peso saturado dos anéis, os conjuntos de amostra-cilindro-tecido-liga foram sobrepostos em bandejas de plástico, nas quais foram adicionadas lâminas de água de 1 cm, para que houvesse a ascensão capilar nas amostras, determinada por um aspecto espelhado no conjunto (Figura 4). Período que levou em torno de 12 horas, quando então foi adicionado água até a borda dos anéis. Depois de obtido o peso saturado por água, por meio da balança de precisão do laboratório, as amostras foram conduzidas para a panela de tensão, sendo submetidas a uma pressão de 0,06 atm, até que fosse extraído a água dos macroporos (poros $\geq 50 \mu\text{m}$ de diâmetro). Então obteve-se o peso drenado. A porcentagem de macroporos foi estimada pela diferença entre o peso saturado das amostras e o peso drenado:

$$MaP = \left(\frac{Psat - Pd}{V} \right) \times 100\%$$

Onde,

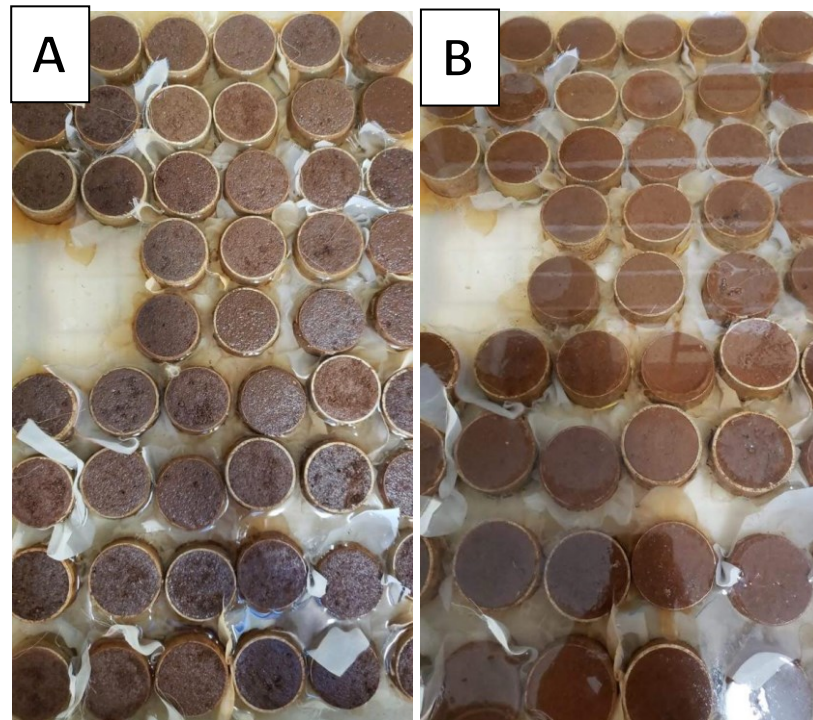
MaP = porcentagem de macroporos

Psat = peso da amostra saturada

Pd = peso da amostra drenada

V = volume da amostra

Figura 4 – Amostras sobrepostas na bandeja sobre lâmina de água de 1 cm com ascensão capilar (A) e amostras sob água até a borda depois da ascensão capilar (B).



Fonte: O autor.

A seguinte etapa constituiu na retirada de água dos microporos (poros < 50 µm de diâmetro), na qual os anéis foram levados à estufa a uma temperatura de 105°C e deixados por 48 horas, até alcançar peso constante. Logo, foram levados ao dessecador para o resfriamento e então pesagem na balança de precisão, para a obtenção do peso seco. A porcentagem de microporos foi estimada pela diferença entre o peso seco das amostras e o peso drenado:

$$MiP = \left(\frac{Pd - Pseco}{V} \right) \times 100 \%$$

Onde,

MiP = porcentagem de microporos

Pd = peso drenado da amostra

Pseco = peso seco da amostra

V = volume da amostra

Assim, obteve-se os valores de porosidade total (microporos + macroporos). Com os valores da massa de solo seco à estufa e o volume já conhecido do anel de Kopec utilizado, foi determinado também a densidade das amostras:

$$Ds = \left(\frac{P_{seco}}{V} \right) \times 100\%$$

Onde,

Ds = densidade de solo da amostra

Pseco = peso seco da amostra

V = volume da amostra

A partir de todos os dados coletados, utilizou-se então o *Excel* para realizar a análise descritiva sobre cada ponto georreferenciado nas duas diferentes profundidades. Já para determinar a correlação linear de *Pearson* (p) entre porosidade, densidade e produtividade da cultura do sorgo foi utilizado o programa *Statistica* (STATSOFT, 2004). Quanto a análise geoestatística e a criação dos mapas adotou-se o software *Surfer 10* (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise descritiva

Como mostra a análise descritiva (Tabela 1) a média e mediana apresentam valores próximos para todos os atributos, com exceção da macroporosidade, nas duas profundidades analisadas. Isso está relacionado aos valores de curtose, que para a maioria dos atributos, representam uma curva de distribuição (mesocúrtica) próxima à normal, exceto para macroporosidade, em ambas as profundidades, com uma curva de caráter leptocúrtica. Em relação à assimetria, a macroporosidade também é o único atributo que apresenta obliquidade, com uma cauda de distribuição dos dados concentrada a direita do eixo simétrico, ou seja, onde há maior concentração de valores positivos e que se distanciam de 0 (GREGO; VIEIRA, 2005).

De acordo com a classificação de Gomes (2009), a maioria dos atributos físicos do solo apresentaram coeficiente de variação médio ($10\% < CV < 20\%$). A Ds apresentou baixo CV ($< 10\%$) e a MaP apresentou-se alta ($CV > 30\%$), bem como a fração silte do solo. Fato que pode ser observado também pelo distanciamento entre mínimo e máximo dos valores obtidos.

Tabela 1. Análise descritiva dos atributos físicos do solo nas camadas de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m e da produtividade do sorgo, referentes à área experimental. Uberlândia, 2019.

Análise Descritiva							
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	CV (%)	Assimetria	Curtose
0 – 0,2 m							
Ds (g/cm³)	1.37	1.91	1.65	1.67	8.13	-0.03	-0.66
MaP (%)	2.49	20.74	6.62	5.45	57.09	2.26	5.69
MiP (%)	21.22	43.43	33.72	34.07	14.81	-0.41	-0.25
PT (%)	29.61	58.98	40.34	39.87	14.28	0.48	0.86
Areia (g/kg)	374.00	710.00	531.92	510.00	17.52	0.24	-0.95
Silte (g/kg)	21.00	270.00	155.66	150.00	44.88	-0.11	-1.23
Argila (g/kg)	209.00	413.00	312.44	311.00	15.08	-0.01	-0.36
0,2 – 0,4 m							
Ds (g/cm³)	1.46	1.92	1.67	1.65	7.32	0.46	-0.75
MaP (%)	1.65	26.38	5.48	5.16	71.48	3.74	17.70
MiP (%)	16.99	54.36	33.31	34.57	18.21	0.02	2.85
PT (%)	29.19	59.28	38.79	39.47	14.80	0.57	1.92
Areia (g/kg)	343.00	707.00	509.34	490.00	18.03	0.19	-0.86
Silte (g/kg)	12.00	230.00	115.30	118.50	47.13	0.13	-0.87
Argila (g/kg)	243.00	493.00	377.36	384.50	16.47	-0.16	-0.50
Sorgo (kg/ha)	2432.88	6700.32	5064.18	5136.46	19.16	-0.74	0.53

Ds: densidade de solo; MaP: macroporos; MiP: microporos; PT: porosidade total; CV: coeficiente de variação.
Fonte: O autor.

A análise descritiva permitiu verificar ainda valores médios de densidade do solo (Ds) elevados (1,65 e 1,67 g/cm³) em ambas as profundidades, que são limitantes para o desenvolvimento das plantas (Tabela 1). Klein (2008), determinou que a densidade a partir 1,45 mg/m³ para solos de textura argilosa é restritiva para plantas. Klein e Marcolin (2011) encontraram também, por uma função de pedotransferência, valores de densidade máxima de 1,55 mg/m³ para um solo argiloso (660 g/kg de argila) e 1,77 mg/m³ para um solo arenoso (320 g/kg de argila), resultados próximos aos encontrados por Santos et al. (2005). Ambos os trabalhos evidenciaram o efeito da textura do solo sobre a densidade. Kiehl (1979) e Sengik (2005) consideraram que, a densidade pode assumir valores superiores a 1,6 g/cm³ em solos arenosos não compactados. Silva et al. (2006) também avaliaram o crescimento da parte aérea de plantas sob diferentes graus de compactação e observaram que a densidade de 1,5 g/cm³ comprometeu o crescimento da parte aérea.

Segundo Camargo e Alleoni (1997), o valor da densidade para solos mais pesados de 1,55 g/cm³ já é considerado crítico. O adensamento do solo repercutiu negativamente no desenvolvimento aéreo e radicular de espécies de milheto (*Pennisetum glaucum*), braquiárias (*U. brizantha*) e crotalária (*C. spectabilis*), (DEZORDI et al., 2013). Por outro lado, Calonego et al. (2011) concluíram que um adensamento intermediário do solo não reduz a produção de fitomassa de sorgo (*Sorghum bicolor*) e braquiárias (*U. ruziziensis*). Percebe-se a estreita relação entre compactação e crescimento de plantas, bem como tendência de respostas inversamente proporcionais das plantas à compactação. Portanto, valores médios de densidade de 1,65 g/cm³ e 1,67 g/cm³, em ambas as profundidades, em solos de textura média argilosa, podem afetar significativamente a produtividade do sorgo na área (Tabela 1).

Os valores de porosidade total (PT) obtidos nas duas profundidades (Tabela 1) se encontram abaixo do ideal para um bom desenvolvimento radicular das plantas. As condições físicas ideais do solo para um bom desenvolvimento vegetal demandam metade da sua composição para porosidade total, sendo desta 66% ocupada com água e 34% para aeração (FIDALSKI et al., 2008). Para Weil e Brady (2008) um solo em boas condições de cultivo deve compor 50% de sólidos (45% minerais e 5% material orgânico) e 50% de poros (metade para microporos e a outra para macroporos). Camargo (1997) e Veloso et al. (1998) também encontraram valores de porosidade total abaixo das condições ideais, com sérios prejuízos ao desenvolvimento das plantas.

A proporção de macroporos (MaP) e microporos (MiP), é semelhante em ambas as profundidades, e se encontram abaixo do ideal para produção agrícola. Neste caso, os valores médios dos poros com diâmetros maiores são os de menores proporções e representam de 14 a 16% da PT, conseqüentemente elevando a porcentagem dos poros de diâmetros menores para 84 a 86 %, fator indicativo de compactação do solo. A macroporosidade apresenta limite crítico estabelecido em valores mínimos de 10%, a partir do qual é limitante para o desenvolvimento radicular da maioria das culturas (REICHERT et al., 2010). Já de acordo com Watanabe et al. (2002), a depender da espécie vegetal, atividade biológica do solo e regime de umidade, valores de macroporos de 10 a 15 % são considerados restritivos para produtividade das plantas.

Em relação à textura do solo e seus agregados, as unidades estruturais se diferenciam em tamanho, forma e resistência, inferindo na aeração, fluxo de água e na densidade do solo (AZEVEDO; DALMOLIN, 2004). Além disso, essa estruturação influi sobre a porosidade do solo, sendo o arranjo entre sólidos e vazios. Vale ainda destacar que a alternância entre faixas de solo arenosas e argilosas, caracterizada pela agregação das partículas, quantifica a

porosidade do mesmo e o qualifica quanto ao diâmetro delas. Portanto, as faixas argilosas são menos densas, ao considerar maior quantidade de porosidade intra-agregados e a maior massa específica da areia (BRADY; WEIL, 2008).

Os fatores apresentados na análise descritiva são indicativos de uma variabilidade espacial significativa na área experimental, e pressupõem estreita relação entre os atributos físicos do solo e a produtividade do sorgo. Entretanto, o comportamento de cada atributo avaliado e suas interferências é melhor compreendido por meio dos coeficientes de correlação de *Pearson* (p) representados na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes de correlação de *Pearson* (p) entre os atributos físicos do solo analisados e a produtividade do sorgo. Uberlândia, 2019.

Coeficientes de correlação									
Atributos	Ds020	MaP020	MiP020	PT020	Ds2040	MaP2040	MiP2040	PT2040	Sorgo
Ds020	1.00								
MaP020	-0.32	1.00							
MiP020	-0.59	-0.16	1.00						
PT020	-0.72	0.52	0.76	1.00					
Ds2040	0.59	-0.09	-0.60	-0.58	1.00				
MaP2040	-0.06	-0.08	0.07	0.01	-0.33	1.00			
MiP2040	-0.49	0.08	0.59	0.56	-0.57	-0.40	1.00		
PT2040	-0.56	0.03	0.67	0.60	-0.83	0.26	0.78	1.00	
Sorgo	-0.46	-0.03	0.43	0.35	-0.40	0.18	0.30	0.44	1.00

Ds: densidade de solo; MaP: macroporos; MiP: microporos; PT: porosidade total; 020: 0-0,2 m; 2040: 0,2-0,4 m. *"valores em vermelho" apresentam significância para $p < 0,05$

Fonte: O autor.

Como exposto na Tabela 2, a produtividade do sorgo apresentou correlação negativa com a densidade do solo nas profundidades de 0 – 0,2 m (-46%) e 0,2 – 0,4 m (-40%), o que comprova a influência do adensamento, mostrando que quanto mais denso o solo menor será a produtividade do sorgo. As densidades de solo nas profundidades de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m apresentaram correlação significativa positiva de 59% entre si, pois é uma variável que depende da estrutura, compactação e material constituinte do solo. Letter (1985) e Reichert et al. (2003), também evidenciaram que a densidade de solo é fator indireto na restrição do desenvolvimento de plantas, pois a associação entre ambas depende de fatores intrínsecos e externos à

estruturção do solo, diretamente relacionados a resistência mecânica, água e aeração. Além disso, seus valores tendem a aumentar com a profundidade do solo, devido à redução da matéria orgânica, agregação, porosidade do solo e sua compactação nas camadas mais inferiores (EFFGEN, 2005). Basso et al. (2011) também concluíram que a densidade do solo e a produtividade de forragem de sorgo apresentam correlação negativa.

A densidade do solo e a porosidade total também apresentaram correlação negativa nas profundidades de 0 – 0,2 m (-72%) e 0,2 – 0,4 m (-56%). As duas variáveis são inversamente proporcionais e influem diretamente uma sobre a outra. Kiehl (1979), Camargo & Alleoni (1997), Veloso et al. (1998), Mello Filho et al. (2006), evidenciaram que a densidade do solo possui estreita relação com os atributos físicos porosidade total, macroporosidade e microporosidade, e ainda com a resistência a penetração do solo e sua condutividade hidráulica. Pereira et al. (2010) também verificou alta correlação negativa entre densidade do solo e porosidade total, em um Latossolo Vermelho Distrófico, e denominou o evento de degradação estrutural. Watanabe et al. (2002) observaram a relação desses atributos com a resistência a penetração, por conseguinte compactação do solo.

Em relação a porosidade total e produtividade do sorgo, houve correlação positiva nas camadas de 0 – 0,2 m (35%) e 0,2 – 0,4 m (44%), indicativo de que quanto menor a porosidade total do solo menor será também a produtividade vegetal. Apesar da porcentagem dos poros de aeração estarem muito abaixo do ideal para um solo de textura média, a microporosidade foi a componente da porosidade total que apresentou correlação positiva com a produtividade do sorgo em ambas as profundidades (43% e 30%, respectivamente). Por outro lado, a macroporosidade do solo apresentou correlação negativa com a microporosidade, em ambas as profundidades, o que implica no aumento dos valores de uma componente conforme a outra diminui. Isso já era previsto pelo fato de que a MaP é obtida de forma indireta, sendo a diferença entre PT e MiP. Sendo assim, mesmo que não haja correlação significativa entre a primeira componente com a produtividade do sorgo, ela interfere indiretamente nos seus valores.

3.2 Análise da variabilidade espacial

A dependência espacial entre os atributos físicos que obtiveram correlação entre si e, principalmente com os valores de produtividade do sorgo nos diferentes pontos da área, pôde ser observada a partir dos semivariogramas, cujos modelos foram ajustados para cada atributo avaliado, com base na estimativa da semivariância experimental (Tabela 3, Figura 5).

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas para os atributos físicos do solo analisados e produtividade do sorgo. Uberlândia, 2021.

Atributo	Prof. (m)	Modelo	Co	Co + C	Ao	Aop	GDE (%)
Ds	0 – 0,2	Esférico	0.004	0.008	200	200	50
Ds	0,2 – 0,4	Exponencial	0.0042	0.0072	210	630	42
PT	0 – 0,2	Gaussiano	5	10	200	340	50
PT	0,2 – 0,4	Gaussiano	7	15	200	340	53
MaP	0 – 0,2	Exponencial	8	13	150	450	38
MaP	0,2 – 0,4	Esférico	8	18	200	200	56
MiP	0 – 0,2	Esférico	6	9,8	250	250	39
MiP	0,2 – 0,4	Exponencial	14	26	200	340	46
Argila	0 – 0,2	Esférico	500	900	300	300	44
Argila	0,2 – 0,4	Esférico	1200	1800	200	200	33
Areia	0 – 0,2	Gaussiano	350	770	100	170	55
Areia	0,2 – 0,4	Esférico	700	1400	300	300	50
Silte	0 – 0,2	Esférico	400	750	150	150	47
Silte	0,2 – 0,4	Esférico	800	1250	150	150	36
RP	0 – 0,4	EPP	0.075	-	-	-	-
Sorgo	-	Gaussiano	400000	1000000	260	442	60

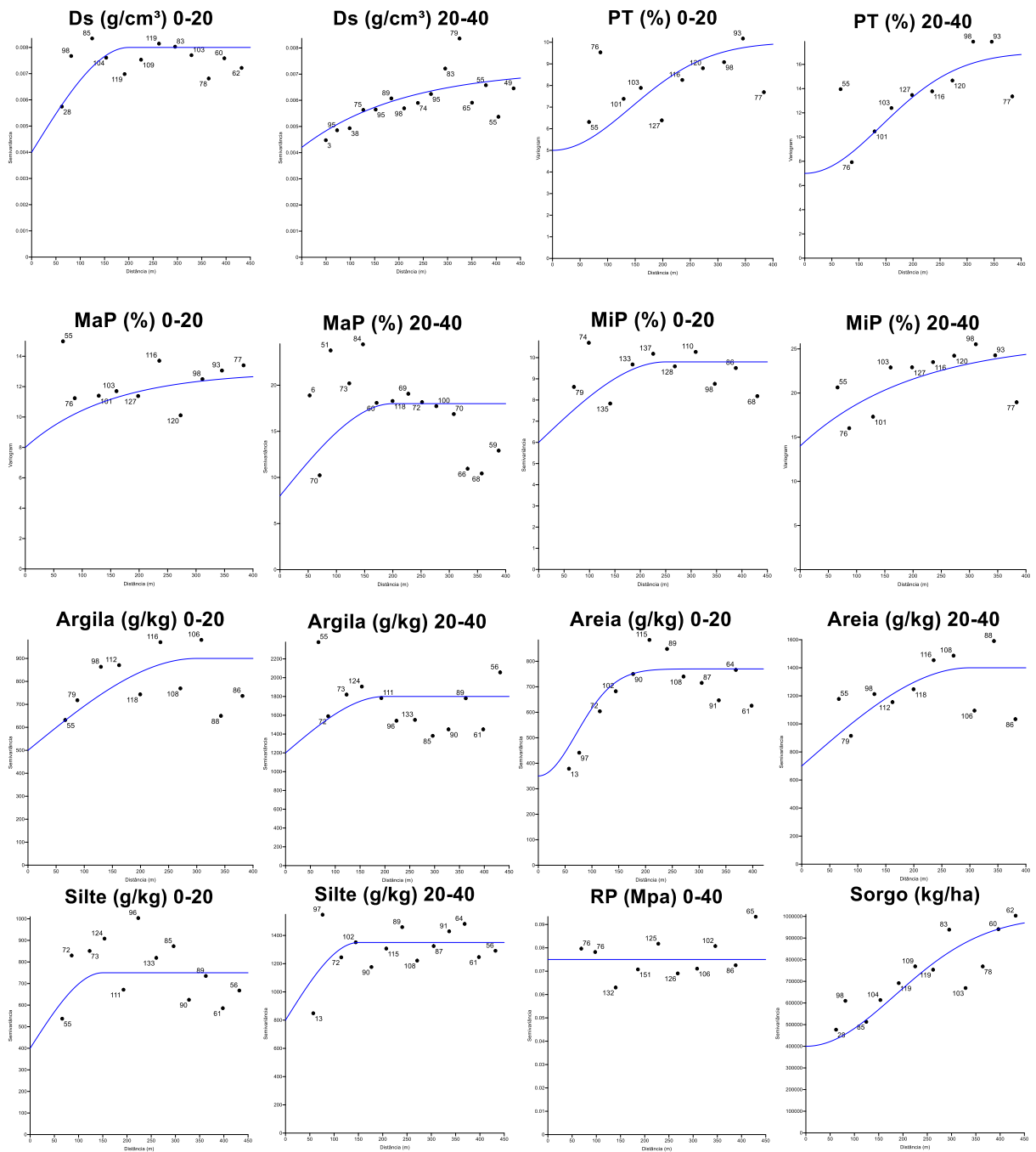
Ds: densidade de solo; PT: porosidade total; MaP: macroporos; MiP: microporos; RP: resistência à penetração; EPP: efeito pepita puro. Prof.: profundidade; Co: efeito pepita; Co + C: patamar; C: variância estrutural; Ao: alcance; Aop: alcance prático; GDE: grau de dependência espacial.

Fonte: O autor.

O alcance (Ao) dos semivariogramas, que representa a máxima distância dentro da qual os pontos amostrais apresentam correlação espacial (ACERBI JÚNIOR et al., 2015), variou de 150 m para o silte de ambas as profundidades, a 630 metros para Ds na camada 0,2 – 0,4 m.

O grau de dependência espacial (GDE) mostrou-se como moderado ($25\% > GDE < 75\%$) para todos os atributos avaliados (ROBERTSON et al., 2008). Vale ressaltar que conforme há aumento do efeito pepita (Co), ao mesmo tempo que os demais parâmetros se mantêm constantes, o grau de dependência espacial reduz. Por outro lado, conforme há o aumento do alcance a dependência espacial entre os pontos tende a aumentar, devido a abrangência de uma área semelhante maior.

Figura 5 – Modelos de semivariogramas para os atributos físicos do solo e produtividade do sorgo.

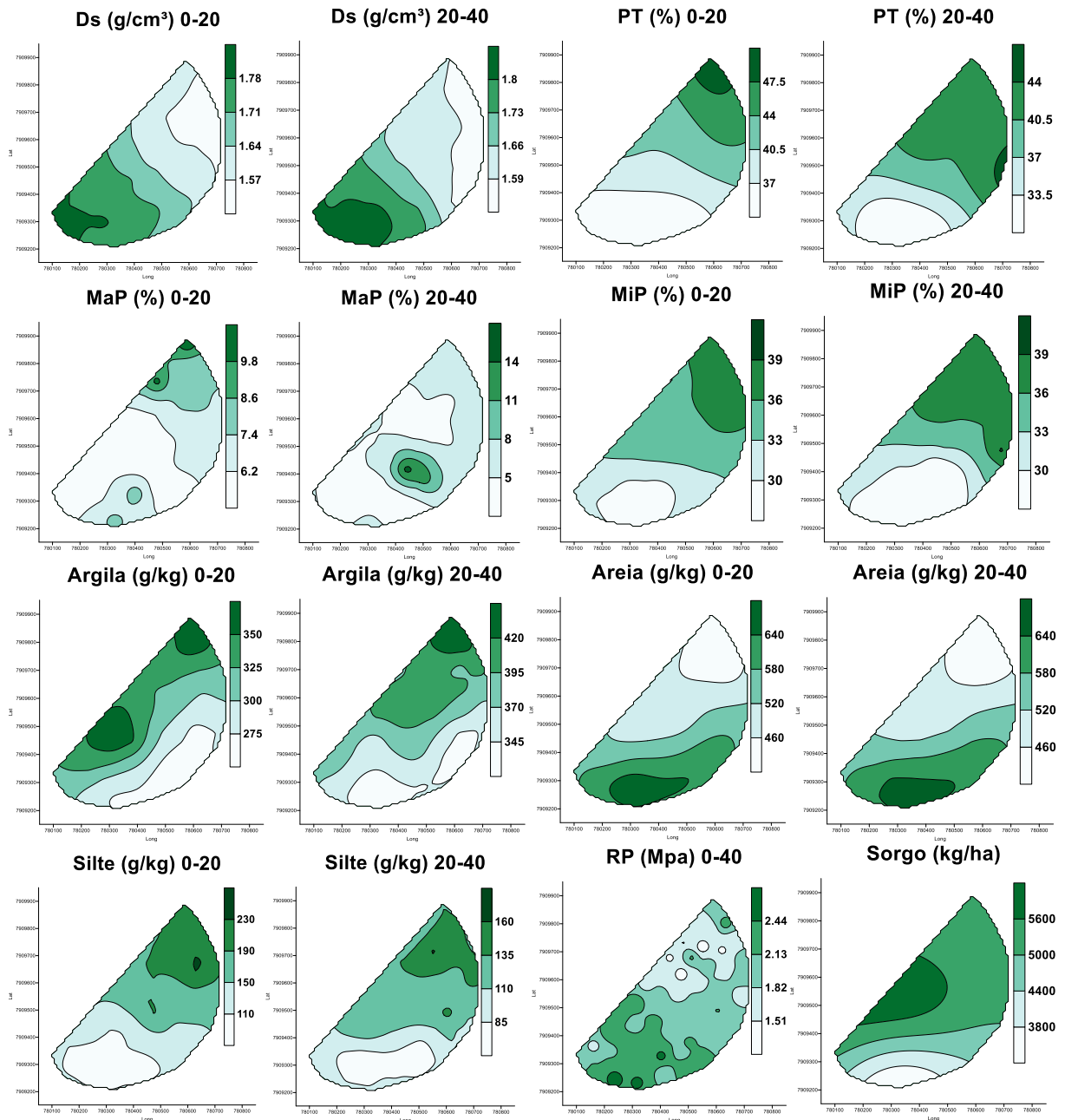


Ds: densidade de solo; MaP: macroporos; MiP: microporos; PT: porosidade total; RP: resistência à penetração; 0-20: 0-0,2 m; 20-40: 0,2-0,4 m.

Fonte: O autor.

Os mapas de contorno (Figura 6) mostram claramente a distribuição espacial dos dados apresentados na análise descritiva. Neles é possível identificar uma zona problemática com maiores valores de densidade do solo e menores valores de porosidade total, associadas ainda a menores valores da produtividade do sorgo.

Figura 6 – Mapas de contorno interpolados por krigagem para os atributos físicos avaliados e produtividade do sorgo.



Ds: densidade de solo; MaP: macroporos; MiP: microporos; PT: porosidade total; RP: resistência à penetração; 0-20: 0-0,2 m; 20-40: 0,2-0,4 m.

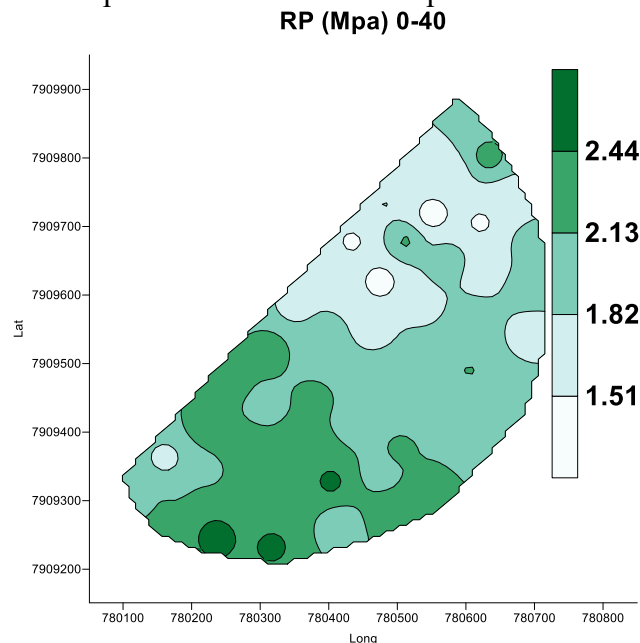
Fonte: O autor.

Ao analisar os mapas de contorno da área experimental (Figura 6), é possível perceber a correlação espacial entre os atributos físicos do solo e a produtividade do sorgo (Tabela 2). A parte inferior do talhão é a que apresentou os menores valores de produtividade da cultura, ao mesmo tempo que compreende a região de maior densidade de solo, fatores associados a nível de 46 e 40% de correlação em cada profundidade, 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m, respectivamente. A

mesma área apresenta ainda, a menor porcentagem de porosidade total, que interage negativamente com a produtividade da cultura em -56 e -60%; bem como baixa porcentagem de microporos, com interação de -49 e -59%, valores que representam em ordem de profundidade as duas camadas de solo avaliadas para os dois atributos. Além disso, os mapas também mostram que na maior parte da área a porcentagem dos macroporos é abaixo do ideal, representado pela média na análise descritiva (6,62% e 5,48% para as camadas de 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m, respectivamente).

Para Libardi (2005) solos arenosos são naturalmente mais densos que solos argilosos, enquanto os siltosos apresentam densidade intermediária. Portanto, o adensamento dessa região pode ser oriundo de compactação por pé de grade, devido ao histórico da área, além de compor naturalmente uma faixa mais arenosa (Figura 6) e conseqüentemente mais susceptível à compactação. A compactação no talhão foi verificada em um trabalho desenvolvido por Reis (2019), ao serem avaliados níveis de resistência à penetração (RP) (Figura 7) e sua influência na produtividade de soja (*Glycne max L.*).

Figura 7 – Mapa de contorno para os valores de RP na profundidade de 0 – 0,4 m.



Fonte: REIS (2019), modificado pelo autor.

Como mostra a Figura 7, a região inferior do mapa compreende a área de maior resistência à penetração, sendo a mesma área de maior adensamento e menor porosidade. Reis (2019) evidenciou ainda, a influência negativa dessa região compactada na produtividade da cultura

da soja, onde obteve-se os menores valores produtivos e os maiores valores de resistência à penetração, com correlação negativa de 40% e 33%, nas avaliações do ano de 2017 e 2018, respectivamente.

Finalmente, todos esses fatores associados permitiram observar a interferência da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo na produtividade do sorgo, além de determinar a região com valores de produtividade abaixo da média em aproximadamente 7.3 hectares da área de estudo total. Aeração, fluxo de água, calor, disponibilização de nutrientes, atividade biológica e a resistência à penetração são os atributos do solo sujeitos às alterações por conta de variações na densidade, principalmente em solos pesados (FREDDI et al., 2007; JIMENEZ et al., 2008; PIFFER; BENEZ, 2009).

4 CONCLUSÃO

A área experimental apresenta significativa variabilidade espacial para todos os atributos físicos do solo e os componentes de textura, bem como para a produtividade do sorgo.

A região de maior adensamento do solo e de menor porcentagem de porosidade total é a que representa a menor produtividade da cultura do sorgo, fatores intimamente relacionados.

Solos arenosos apresentam naturalmente maior densidade, ao mesmo tempo que possuem menor porosidade intra-agregados e conseqüentemente menor porosidade total, sendo limitantes para a produtividade do sorgo.

REFERÊNCIAS

- ACERBI JÚNIOR, F.W.; SILVEIRA, E.M.O.; MELLO, J.M.; MELLO, C.R.; SCOLFORO, J.R.S. Change detection in Brazilian Savannas using semivariograms derived from NDVI images. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n.2, p. 103- 109, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000200001>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542015000200103. Acesso em: 2 set. 2019.
- ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C.; PACHECO, F. B. Preparo do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.147, p.40-45 mar. 1987. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2005/epg/EPG5/EPG5-1%20corrigido.pdf. Acesso em: 27 out. 2019.
- ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.3, p.520-526, 2010. Disponível em: <http://www.revistadeagricultura.org.br/index.php/revistadeagricultura/article/view/3170>. Acesso em: 2 set. 2019.
- AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e Ambiente: uma introdução**. 1.ed. Santa Maria: Gráfica e editora Palotti, 2004.100 p.
- BASSO, F. C.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s.l.], v. 41, n.1, p. 135-144, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-40632011000100006&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 22 out. 2019.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Science Agriculture**, Piracicaba, v. 58, p. 555-560, 2001. DOI: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.7099>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-40632011000100006&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 17 out. 2019.
- BERTOLINI, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 155-163, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100015. Acesso em: 17 out. 2019.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832006000400001&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 2 set. 2019.

CALONEGO J. C. *et al.* Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 289-296, 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7632>. Acesso em: 10 out. 2019.

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

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campina Grande, v. 33, p. 147-157, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000100008>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000100008&lng=en&nrm=iso. Acesso em 5 nov. 2019.

CARVALHO, S. R. L.; VILAS BOAS, G. S.; FADIGAS, F. S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. **Cadernos de Geociências**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.63-79, 2010. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2887/1/Marcia%20Regina.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileiro – grãos**: Sétimo levantamento, abril 2021 – safra 2/2021. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em 12 abr. 2021.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Strategy of specification of management areas: rice grain yield as related to soil fertility. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.1, p. 45-54, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100005>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832013000100005. Acesso em: 16 maio 2021.

DEZORDI, G. B. *et al.* Desenvolvimento aéreo e radicular de espécies vegetais em Latossolo Vermelho distroférico sob compactação induzida. **Revista Scientia Plena**, Aracaju, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2013. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/827>. Acesso em: 3 mar. 2020.

EFFGEN, T. A. M. DARDENGO, M. C. J. D.; EFFGEN, E. M.; REIS, E.; PASSOS, R. R. **Atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo em diferentes posições de amostragem, sob cultivo de citros (Citrus sp)**. In: IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E V ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2005, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Anais [...] São José dos Campos: UNIVAP, 2005. p. 1750-1753.

EFFGEN, E. M.; DARDENGO, M. C. J. D.; SILVA, P. A.; PASSOS, R. R.; EFFGEN, T. A. M. **Caracterização de atributos físicos de solos em área sob cultivo de sorgo no sul do estado do Espírito Santo.** *In: IX ENCONTRO LATINO- AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E V ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO*, 2006, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Anais [...] São José dos Campos: UNIVAP, 2006.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. Brasília-DF, 2017.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; LUGÃO, S.M.B.; BARBERO, L.M.; COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 43, n. 11, p. 1583-1590, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001100018>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/9DSmY4ZpfLjHQHHXk54tpVN/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 maio 2021.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 627-636, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400003>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000400003. Acesso em: 10 out. 2019.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer:** guia do usuário (version 9.0). Golden, Colorado, 1999. 679p.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental.** 15.ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451p.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/188929068.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2021.

JIMENEZ, R. L. *et al.* Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200002>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000200002. Acesso em: 25 set. 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Boletim Técnico – Agricultura de Precisão.** Brasília, DF: Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo, 2013, 3 ed., 36 p.

JOAQUIM JUNIOR, G.O.; CICHOTA, R.; CONDINI, F.G.M.; VAN LIER, Q.J. **Padrões de variabilidade espacial para densidade e umidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo álico.** *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA*, 14., Cuiabá, 2002. CD-ROM.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: EDIUPF, 2008. 212p.

LETTER, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, California, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

LLANILLO, R. F.; RICHART, A.; FILHO, J. T.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina, v. 27, n. 2, p. 205-220, 2006.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 16 fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1807-86212011000200022&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 2 set. 2019.

MELLO FILHO, J. F. *et al.* Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo coeso dos Tabuleiros Costeiros da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 199-205, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000200002>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542006000200002&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 out. 2019.

PEREIRA, S. A.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, J. P. Análise de componentes principais dos atributos físicos de um Latossolo vermelho distrófico típico sob pastagem e mata. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 03, n. 02, p.87-97, 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/19027/1/257-1223-2-PB1.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

REICHERT, J.M. *et al.* Mecânica do Solo. In: Jong Van Lier, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 29-102, 2010.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n.4, p. 981-988, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000400012>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000400012&lng=pt&tlng=pt. 2 set. 2019.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REIS N. C. **RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NA ANÁLISE ESPACIALIZADA DA PRODUTIVIDADE DE SOJA**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 14 p., 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28266>. Acesso em: 10 out. 2019.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User’s guide. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. 152p.

RODRIGUES FILHO, O.; FRANÇA, A. F. S.; OLIVEIRA, R. P.; OLIVEIRA, E. R.; ROSA, B.; SOARES, T. V.; MELLO, S. Q. S. 2006. Produção e composição bromatológica de quatro híbridos de sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] submetidos a três doses de nitrogênio. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 7, n. 1, p. 37-48. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/vet/article/view/389>. Acesso em: 8 maio 2020.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400008>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000400008. Acesso em: 10 out. 2019.

SANTOS, P.A. *et al.* Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 287-295, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200014>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832005000200014&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 25 set. 2019.

Piffer, C. R.; Benez, S. H. Demanda energética de uma semeadora de fluxo contínuo em três sistemas de manejo do solo. **Revista Energia na Agricultura**, [s.l.], v. 24 (4), p. 21-32, 2009.

SCARDUA, RUBENS. **Irrigação**. Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”. Departamento Editorial. Piracicaba, 1986.

SENGIK, E. **Roteiros de aulas práticas**: curso solos e adubação para zootecnia. Maringá: [s. n.], 2005.

SILVA, E. M. S. *et al.* Sorghum starch as depressant in mineral flotation: part 1 – extraction and characterization. **Journal of Materials Research and Technology**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 396-402, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.001>. Disponível em: <https://www.mendeley.com/catalogue/c7ede312-16e5-3e94-bcad-bc5fb015599b/>. Acesso em: 3 mar. 2021.

SILVA, G. J.; SOUZA, J. C; 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, p.31-40, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100004>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832006000100004&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 25 set. 2019.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; ZUCOLOTO, M. Distribuição espacial das frações granulométricas em um Latossolo Vermelho amarelo utilizando krigagem indicativa. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 195-202, 2011.

STATSOFT INC. 2004. *Statistica*: data analysis software system, version 7. Tulsa. Disponível em: <http://www.statsoft.com/>

TESINI, J.R. **Desempenho produtivo aos 21 dias de corte submetidos a dietas formuladas com grãos de sorgo de diferentes cultivares**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/12247/1/GFMVSouzaDISPRT.pdf>. Acesso em: 2 set. 2019.

TAVARES FILHO, J.; RIBBON, A. A. Resistência do solo à penetração em relação ao número de amostras e ao tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 487-494, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200003>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832008000200003&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 25 set. 2019.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvares, V. V. H.; Schaeffer, C. E. G. R. (eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-54.

VELOSO, C. A. C. Á.; CARVALHO, E.; REGO, S.M. Efeito da mecanização sobre a matéria orgânica e alguns parâmetros físicos em Latossolo Amarelo cultivado com citros no município de Capitão Poço - PA. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12, 1998, Fortaleza. **Resumos** [...]. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; PINTO, J. C.; COSTA, A. C. S.; MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, p.1255-1264, 2002. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2277>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2277>. Acesso em: 2 set. 2019.