

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA DE SOJA E IDENTIFICAÇÃO DE
FATORES EDÁFICOS LIMITANTES A ALTAS PRODUTIVIDADES**

Autor: Henrique Menezes Santos
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

RIO VERDE – GO
FEVEREIRO – 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

**VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA DE SOJA E IDENTIFICAÇÃO DE
FATORES EDÁFICOS LIMITANTES A ALTAS PRODUTIVIDADES**

Autor: Henrique Menezes Santos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Produção Vegetal Sustentável do Cerrado.

RIO VERDE – GO
FEVEREIRO - 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

SA237v Santos, Henrique Menezes
Variação na taxa de semeadura de soja e
identificação de fatores edáficos limitantes a
altas produtividades / Henrique Menezes Santos;
orientador Gustavo Castoldi. -- Rio Verde, 2018.
60 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias -
Agronomia) -- Instituto Federal Goiano, Câmpus Rio
Verde, 2018.

1. População. 2. Agricultura de precisão. 3.
Geoestatística. 4. Mapa de Colheita. 5. Taxa
Variável. I. Castoldi, Gustavo, orient. II.
Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA DE SOJA E IDENTIFICAÇÃO DE
FATORES EDÁFICOS LIMITANTES A ALTAS PRODUTIVIDADES

Autor: Henrique Menezes Santos
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia
Área de Concentração: Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

Prof. Dr. Adriano Perin
Avaliador externo
IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues
Avaliador interno
IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Gustavo Castoldi
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

“Cada um de nós compõe a sua história,
Cada ser em si, carrega o dom de ser capaz, e ser feliz”.

Almir Sater e Renato Teixeira

Ao meu pai Marcos Takahashi dos Santos
A minha mãe Sônia Maria Menezes dos Santos

DEDICO

A toda minha família que me ampara, ajuda e torna a vida mais fácil e prazerosa,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por proporcionar saúde, felicidade, paz e me guiar sempre nos momentos mais difíceis.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos e ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, pela oportunidade deste trabalho.

À Fazenda Tropical, por disponibilizar a área para o estudo e equipe para execução das atividades, em especial ao Sr. Mario Van Den Broek, pela amizade e dedicação durante o trabalho.

Agradeço ao orientador e amigo Gustavo Castoldi, pela paciência e dedicação na orientação durante estes anos. Seu trabalho me desenvolveu imensamente quanto pessoa e profissional.

Aos meus avós Benjamim e Luzia, por todo seu carinho e amor.

Ao meu irmão, pela sua amizade e exemplo de trabalho.

À minha namorada Rebeca Mancini, pela paciência, companheirismo e amor nesta e todas as outras fases de minha vida.

Agradeço a todo o grupo do Polo de Inovação e em especial ao Professor Carlos e aos alunos Thomas, Matheus e Alice, que sempre me apoiaram e ajudaram durante o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos avaliadores Adriano Perin e Carlos Ribeiro, pelas contribuições pertinentes referentes à dissertação.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Henrique Menezes Santos, nascido em Rio Verde – GO em 10 de setembro de 1992. Graduado em Engenharia Agrônômica no ano de 2015, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Jaboticabal. Iniciou a carreira profissional como consultor na Pollo Agricultura de Precisão em 2014 e trabalhou por dois anos. Em 2016, trabalhou como coordenador na APagri Consultoria Agrônômica por sete meses, em Rio Verde – GO, e desde junho 2017 é coordenador de tecnologia agrícola na Cruzeiro do Sul Grãos em Ribeirão Preto - SP. Em 2016 ingressou na pós-graduação *Stricto Sensu*, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, linha de pesquisa, Tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água. Em fevereiro de 2018, defendeu sua dissertação, parte indispensável para a obtenção do diploma de Mestre em Ciências Agrárias – Agronomia.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES...xi	xi
RESUMO	12
Introdução Geral.....	14
1. Tecnologia no sistema de produção de grãos.....	14
2. Identificação de zonas de manejo e atributos que limitam a produtividade	16
3. Mapa de colheita e Semeadura em taxa-variável.....	17
Objetivos	20
Objetivo Geral.....	20
Objetivos Específicos.....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
CAPÍTULO I.....	24
Introdução.....	25
Material e Métodos.....	26
Resultados e Discussão.....	28
Conclusões.....	34
Agradecimentos.....	34
Referências	34
CAPÍTULO II.....	46
Introdução.....	47
Material e Métodos.....	48
Resultados e Discussão.....	49
Conclusão	51
Agradecimentos.....	52
Referências	52

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - Geoestatística e mapa de colheita como ferramentas para identificação de atributos limitantes da produtividade de soja

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo e produtividade.	40
Tabela 2. Correlação da produtividade e grupos de produtividade com os atributos do solo.....	41
Tabela 3. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados.	41
Tabela 4. Caracteres com maiores cargas fatoriais (escores) selecionadas dentro de cada fator.	44
Tabela 5. Análise de regressão dos atributos do solo com a produtividade	45

CAPÍTULO 2: - Parâmetros produtivos de uma cultivar de soja em função da variação da densidade de semeadura em áreas com textura muito argilosa e argilosa

Tabela 1. Características químicas e texturais do solo (camada 00-20 cm) em que os experimentos foram conduzidos.	57
Tabela 2. Resumo da análise de variância e médias observadas das variáveis analisadas nas áreas 1 e 2.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Introdução Geral

Figura 1. Interesse de pesquisa pelo termo “Precision Agriculture” nos últimos cinco anos segundo Google Trends.	15
Figura 2. Ganho de produtividade e redução do uso de insumos proporcionados pelo uso de taxa variável.	15
Figura 2. Colhedora de grãos; sensor de impacto; receptor de sinal de GPS; monitor de operações. (Fontes: John Deere 2017; Morgan 1998)	18
Figura 3. Adoção de técnicas de AP relacionadas com a variabilidade espacial das lavouras. (Fonte: adaptado de Molin 2017)	19

CAPÍTULO 1 - Geoestatística e mapa de colheita como ferramentas para identificação de atributos limitantes da produtividade de soja

Figura 1. Localização da área e malha de amostragem (A); Teor de argila ($g\ kg^{-1}$) (B).40	
Figura 2. Semivariogramas e mapas dos atributos do solo e produtividade.....	42
Figura 3. Gráfico dos fatores, seus pesos e a porcentagem de variância total explicada. Em que CP1= 37,5%; CP2= 20,8%; CP3= 9,5%; CP4= 7,4%.	43
Figura 4. Diagrama da ordenação da análise de componentes principais dos atributos químicos e argila do solo.	45

CAPÍTULO 2: - Parâmetros produtivos de uma cultivar de soja em função da variação da densidade de semeadura em áreas com textura muito argilosa e argilosa

Figura 1. Mapa de localização dos experimentos	57
Figura 3. Número de ramos, Número de vagens e Número de grãos em função da variação da densidade de plantas quando cultivada em solo com 67% de argila.	59
Figura 4. Regressão da Produtividade, Número de ramos, Número de vagens e Número de grãos em função da variação da densidade de plantas quando cultivada em solo com 39% de argila.	60

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / Sigla	Significado
AP	Agricultura de Precisão
TV	Taxa Variável
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
MO	Matéria Orgânica
P	Fósforo
Al	Alumínio
K	Potássio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
S	Enxofre
Al	Alumínio
H+Al	Hidrogênio
SB	Soma de Bases
V%	Saturação por Bases
g dm ⁻³	Gramas por decímetro cúbico
mmol _c dm ⁻³	Milimol por decímetro cúbico
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
sc ha ⁻¹	Sacas por hectare
g kg ⁻¹	Gramas por quilograma
C ₀	Efeito Pepita
C ₀ + C ₁	Patamar
GDE	Grau de dependência espacial

RESUMO

SANTOS, HENRIQUE MENEZES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2018. **Variação na taxa de semeadura de soja e identificação de fatores edáficos limitantes a altas produtividades.** Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi.

RESUMO – A adoção da Agricultura de Precisão (AP) no sistema de produção de grãos propiciou maior eficiência na correção e adubação dos solos brasileiros. Esse manejo permitiu atingir novos patamares de produtividade e obter um banco de informações da lavoura. Porém, para melhor aproveitamento das ferramentas e informações de AP, ainda faltam protocolos para análise e interpretação dos dados de forma multidisciplinar. Nesse contexto, objetivou-se identificar os atributos da fertilidade do solo que limitaram a produtividade de uma área de soja utilizando mapa de colheita e geoestatística, bem como avaliar a possibilidade da variação da taxa de semeadura de soja. O trabalho foi realizado no município de Montividiu, sudoeste de Goiás. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0,0 – 0,2 m georreferenciadas e na densidade de 1 ponto ha⁻¹. Foi determinado o teor de argila e atributos químicos do solo. A produtividade foi medida por meio da colhedora. Os dados foram submetidos à análise estatística, multivariada e geoestatística para determinação da variabilidade espacial. Para a avaliação da possibilidade da variação da taxa de semeadura, foram conduzidos dois experimentos, um em área de textura muito argilosa e outro em área de textura argila arenosa. Foi semeado a cultivar Power IPRO de médio engalhamento com densidade de 600.000 sementes ha⁻¹. Em estágio V2 foi feito o desbaste para ajuste dos tratamentos: 240, 300, 360, 420 e 480 mil plantas ha⁻¹. Foi avaliada a altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de ramos, número de vagens, número de grãos e produtividade. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e posterior análise de regressão. Os resultados demonstraram que o teor de argila, CTC, matéria orgânica e magnésio foram os atributos limitantes à produtividade de soja nessa área. Na área muito argilosa, a variação da densidade de semeadura não resultou em diferença de produtividade. Na área argilosa, recomenda-se utilizar uma população de 388.000 plantas m⁻¹ para obtenção da maior produtividade para esse cultivar.

Palavras-chave: População, agricultura de precisão, geoestatística, mapa de colheita, taxa variável.

Variation of soybean sowing rate and identification of limiting edaphic factors to high yields

ABSTRACT – The adoption of Precision Agriculture (PA) in the grain production system increased the correction and fertilization efficiency of Brazilian soils. This management enabled to reach new levels of productivity as well as to obtain a large data from crops. However, for a better use of the PA tools and informations, protocols for analyzing and interpreting data in a multidisciplinary way are still lacking. In this context, the aim of this study was to identify soil fertility attributes that limited the productivity of a soybean area using a yield map and geostatistics, as well as to evaluate the possibility of soybean sowing rate variation. The work was carried out in an area of 232 ha in the city of Montividiu, southwest Goiás. Soil samples georeferenced were collected at the depth of 0.0 - 0.2 m and at the density of 1 point ha⁻¹. It was determined the clay content and chemical attributes of the soil, the yield was measured by harvester sensor. Data were submitted to statistical, multivariate and geostatistical analysis to determine spatial variability. For the evaluation of the possibility of sowing rate variation, two experiments were carried out, one in a very clayey texture area and the other in a sandy clay texture. The variety IPRO Power was sowed with density of 600,000 seeds ha⁻¹. In the V2 stage the thinning was done to adjust the treatments: 240, 300, 360, 420 and 480 thousand plants ha⁻¹. The plant height, height of insertion of the first pod, number of branches, number of string bean, number of grains and yield were evaluated. The results showed that the content of clay, CTC, organic matter and magnesium were the limiting attributes of soybean yield. Data were submitted to analysis of variance and subsequent regression analysis. In the very clayey area the variation of the density of sowing did not result in different yield. In the clayey area it is recommended to use a population of 388.000 plants m⁻¹ to obtain the highest yield for this variety.

Key words: Population, precision agriculture, geostatistics, yield map, variable rate tax.

Introdução Geral

1. Tecnologia no sistema de produção de grãos

Nos últimos 40 anos, o Brasil foi o maior protagonista da revolução verde na América Latina. Na cultura de soja, superou a produção modesta de 12 milhões de toneladas para se tornar o atual maior exportador e segundo maior produtor do mundo. Para isto, milhões foram os investimentos em pesquisa e através de muito trabalho foi sendo aprimorado ano após ano o manejo dos solos, engenharia genética, plantio direto, defensivos agrícolas e tecnologia.

O emprego de calcário e uso adequado de adubos permitiram a exploração de novas fronteiras agrícolas e aumento da produtividade. As novas cultivares de soja apresentam menor ciclo e possibilitam o cultivo da segunda safra, tornando o cultivo apto em boa parte das regiões agrícolas do Brasil. Novas moléculas químicas auxiliaram no controle a doenças e insetos mais eficiente. Por último e mais recente, o desenvolvimento dos computadores, internet e GPS (Sistema de Posicionamento Global) proporcionaram o surgimento da agricultura de precisão (AP) que promoveu a revolução digital na agricultura.

A agricultura de precisão proporcionou transformações na agricultura brasileira em velocidade muito alta. Primeiramente, ocorreu a popularização do GPS sequenciado pelo desenvolvimento de sensores de colheita. Após essa fase, surgiu as coletas de solo georreferenciadas, seguidas por modelagem de mapas para correção e adubação do solo em taxa variada (Resende et al., 2010). Todo esse pacote tecnológico propiciou o novo conceito de manejo em sítio específico ou zonas de manejo.

Nos últimos cinco anos, a pesquisa no mundo pelo termo “Precision Agriculture” dobrou de interesse segundo a ferramenta Google Trends (Figura 1) A informação mostra a crescente demanda por procura e desenvolvimento em tecnologia agrícola. No setor canavieiro, as motivações por adoção da AP tem sido otimização do tráfego da frota agrícola, ganhos de produtividade e qualidade industrial (Silva et al., 2010). Para as culturas graníferas, um dos principais benefícios da AP é a identificação de oportunidades de redução de custos na correção e adubação do solo, sem provocar perdas de produtividade (Hurtado et al., 2008).

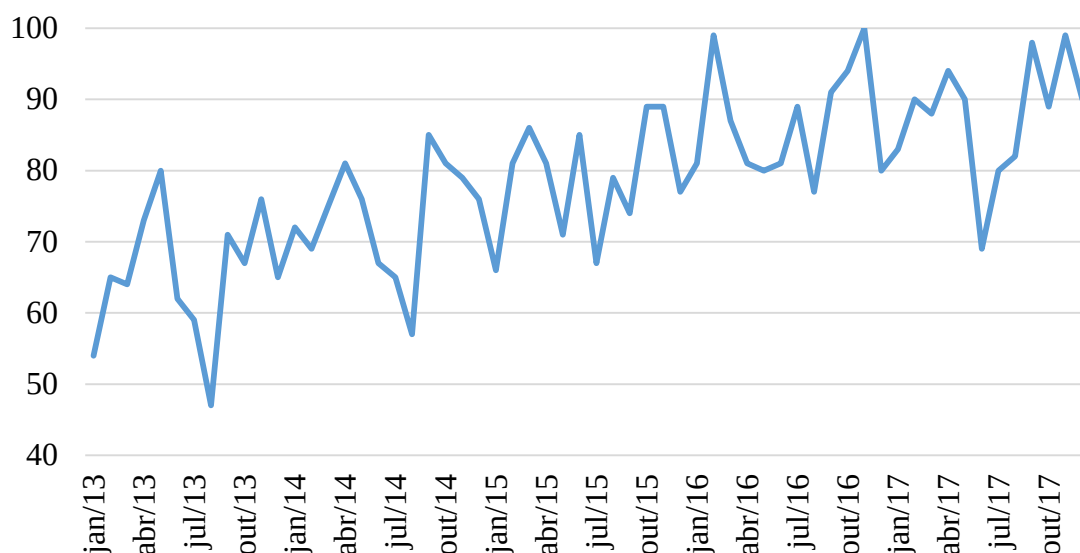


Figura 1. Interesse de pesquisa pelo termo “Precision Agriculture” nos últimos cinco anos segundo Google Trends (Janeiro/2018).

A utilização das técnicas de AP promove o aumento da produtividade de forma sustentável. Estudos com aplicação de fertilizantes em taxa variável mostraram que o aumento da produtividade chegou em até 34% quando comparado com a aplicação em taxa fixa, e no mesmo ocorreu a redução de 23% do consumo de fósforo (Molin et al., 2010). Na correção de solos com métodos de AP, as reduções nas doses de calcário chegaram entre 27-30% (Lopes & Molin, 2010; Barbieri et al., 2008). Trabalhos também indicaram que houve redução de 20 % no consumo de água de irrigação para milho e pastagem utilizando técnicas de AP (Hedley & Yule, 2008).

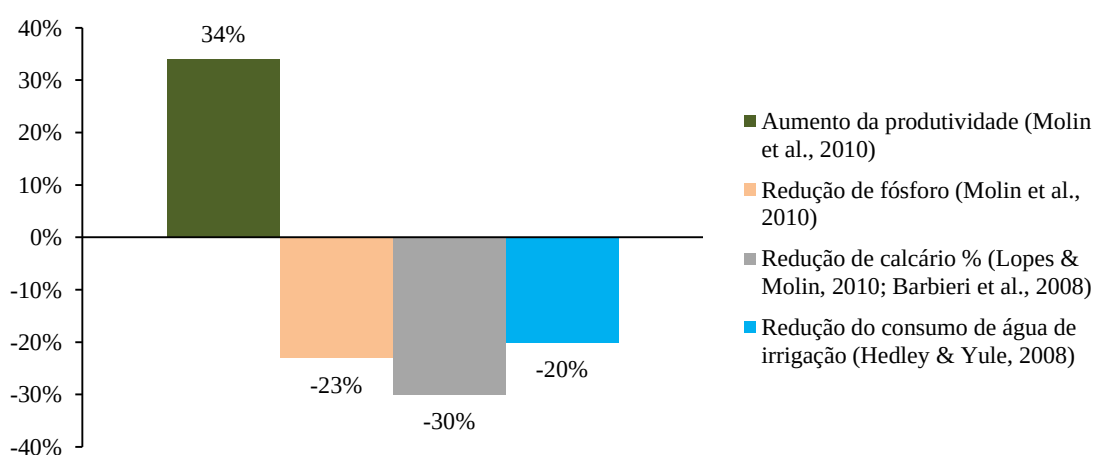


Figura 2. Ganho de produtividade e redução do uso de insumos proporcionados pelo uso de taxa variável.

A sustentabilidade da AP é confirmada através de estudos que demonstraram a redução da contaminação ambiental com o aumento da eficiência na utilização dos

insumos. A lixiviação de Nitrogênio na cultura do milho foi reduzida entre 25% e 47% (Delgado e Bausch, 2005). Em citros a contaminação ambiental por pesticida foi reduzida em 92% (Du et al., 2008).

Diante deste histórico, os benefícios proporcionados pela AP são evidentes, e quanto maior a diversidade e variabilidade encontrado nos solos e propriedades agrícolas, maiores são os resultados obtidos pela utilização das ferramentas de AP (Tekin, 2010; English et al., 2000). Porém, para propriedades avançadas em tecnologia, ainda faltam estudos e técnicas que compilam o banco de informações para melhor aproveitamento.

2. Identificação de zonas de manejo e atributos que limitam a produtividade

Áreas de agricultura tecnificada utilizam AP há muitos anos, que através do uso de sensores, mapas de fertilidade, mapas de produtividade, imagens de satélite e outras tecnologias, adquiriram um vasto pacote de informações históricas. Muitas vezes, pela complexidade e quantidade de dados obtidos, a interpretação individualizada das informações não torna possível a identificação de fatores limitantes na produção. Por isso há a importância de obtenção de informações de qualidade e que sejam interpretadas em base agronômica (Coelho, 2008).

O termo zonas de manejo foi definido como áreas de mesmo potencial de produção em que é empregado insumos em quantidade eficiente e de forma sustentável (Luchiari Junior et al. 2000). Diante um cenário com enorme quantidade de dados de produção, pesquisadores têm mostrado a integração de informações e técnicas para a identificação de zonas de manejo específico.

Campos et al. (2009) separou ambientes de produção através da associação de modelos digitais de elevação com mapas de atributos físicos e químicos do solo. Em outro estudo, mapas de produtividade de soja, milho e trigo durante 6 anos consecutivos delinearão áreas com diferentes potenciais produtivos (Santi 2007). Carmo et al. (2016) utilizou a cor do solo para identificar áreas com diferentes potenciais produtivos na cultura do café.

Além da grande quantidade de dados disponíveis, a interpretação interdisciplinar dos mesmos não é uma análise simples. Para melhor entendimento dos atributos do solo e suas interferências no ambiente de produção, pesquisas foram feitas utilizando ferramentas de análise multivariada e análise espacial como a geoestatística.

Estudos mostraram através da geoestatística que é possível identificar áreas com diferentes potenciais produtivos de citros e cana-de-açúcar através da compartimentalização do relevo (Leão et al. 2010; Siqueira et al., 2010a). Na cultura do café, a produtividade foi relacionada com o mapa da espessura do solo (Sanchez et al. 2012b).

Diante desse cenário, é evidente a necessidade da criação de protocolos para a interpretação da grande quantidade de dados gerados pela AP. O emprego de técnicas e práticas eficientes garantem a manutenção da produtividade em sintonia com os princípios da sustentabilidade.

3. Mapa de colheita e Semeadura em taxa-variável

O mapa de produtividade de uma lavoura é representado através de um conjunto de pontos registrados por uma colhedora. Esses pontos são pequenas amostras georreferenciadas da quantidade de grãos colhidos naquele determinado local. (Molin 2014). No Brasil, essa ferramenta é bastante comum e costuma ser a pioneira na implantação da agricultura de precisão em uma propriedade.

Muitos pesquisadores consideram o mapa de produtividade essencial para corrigir fatores que limitam a produção e como a ferramenta mais completa para determinar a variabilidade espacial das lavouras (Capelli 2004; Molin 2002). Para uma boa representação temporal é recomendado pelo menos três anos de mapeamento, a análise de um único mapa pode ser restritivo e não representar de forma adequada as zonas de manejo (Santi 2007; Blackmore et al., 2003).

Para a geração de um mapa de produtividade, a colhedora necessita de um sensor de medição de fluxo de grãos, que estima os grãos colhidos em toneladas por hectare (Figura 2). Existem vários modelos disponíveis no mercado, sensor por medição de volume através de luz; sensor de célula de carga; sensor radiométrico, sendo que o mais comum é o sensor de impacto que é uma placa de impacto que se localiza na trajetória dos grãos que passam pelo elevador da máquina. Além do sensor, é necessário um sistema de GPS que irá localizar as coordenadas geográficas em que máquina opera e também um computador de bordo em que irá salvar todas as informações coletadas no campo pela máquina e sensores.



Figura 3. Colhedora de grãos; sensor de impacto; receptor de sinal de GPS; monitor de operações. (Fontes: John Deere 2017; Morgan 1998)

Antes da elaboração do mapa de produtividade, os dados brutos precisam ser analisados cuidadosamente (Missotten et al., 1996). Os pontos errôneos que quantificaram produtividade muito baixa ou muito alta precisam ser filtrados para que o mapa tenha boa representatividade e informação de qualidade (Menegatti & Molin 2004).

Outra ferramenta que está em crescente utilização na agricultura de precisão é a semeadura em taxa variável (TV). Desde 2005, o número de equipamentos com taxa variável de sementes e fertilizantes em linha tem aumentado de 40 a 60% na América Latina (Mendez, 2011). No mercado norte americano este número também tem aumentado (Fulton, 2009a), 30 % das propriedades do cinturão do milho possuem semeadoras deste tipo (Paszkievicz & Butzen, 2007).

Para que a semeadura em TV seja eficiente, é necessário um mapa de prescrição das doses ou populações de sementes desejadas. Porém, critérios de recomendação ainda são quase inexistentes pelo baixo número de estudos nesse ramo. No Brasil, um dos primeiros estudos com semeadura em TV foi à avaliação da variação de doses de fertilizantes formulados e da população de milho na operação de semeadura. O estudo verificou que as maiores populações de milho obtiveram menores produtividades quando comparado com a população uniforme (Molin et al., 2016).

Na tentativa de aprimorar os critérios para recomendação de semeadura em TV, um estudo constatou que as produtividades de soja variaram de acordo com o relevo e densidade de semeadura. Portanto, a população de sementes deve ser definida não somente em função do cultivar, mas também em função do relevo (Uhry 2013).

Outro estudo relacionado à TV de sementes, avaliou através de publicações passadas a acurácia das semeadoras. Foi identificado que em virtude dos erros sistemáticos de algoritmos, calibração de máquinas e falhas de germinação, as semeadoras atingiram o nível de acurácia de até 34,75%, que é desempenho insuficiente (Machado et al., 2015).

Em uma pesquisa recente realizada pela empresa Kleffmann Group em 2013 (Figura 3), entre 992 produtores entrevistados na região Sul e Cerrado foram registrados que 45% desses produtores utilizam alguma técnica de AP e que somente 28% desses adotam sementes em população variável. A técnica mais utilizada pelos produtores entrevistados é a aplicação de fertilizantes em TV (58%).

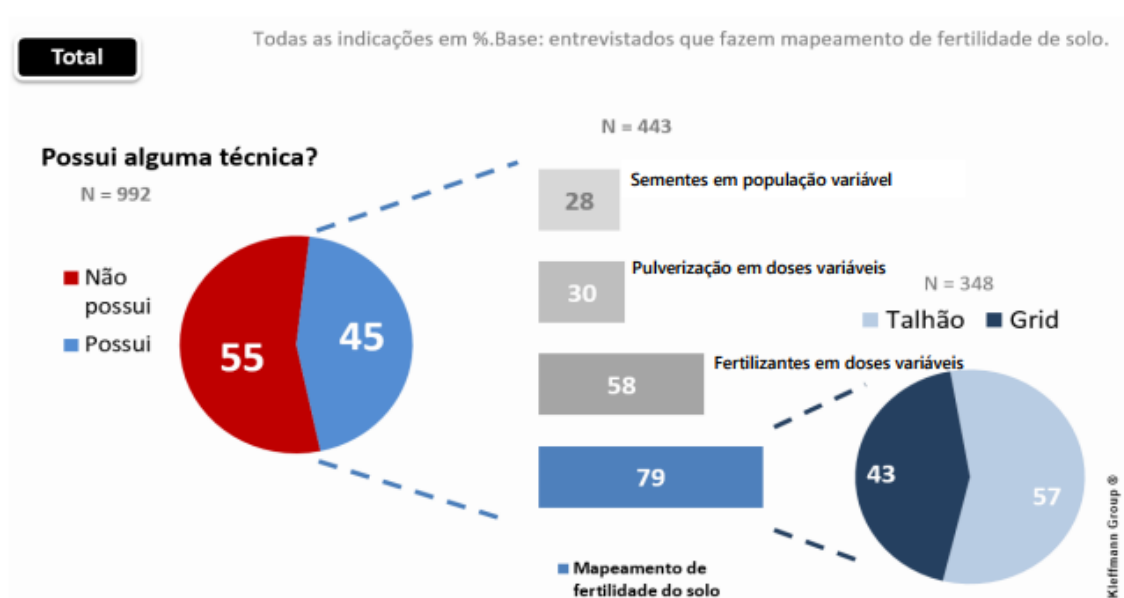


Figura 4. Adoção de técnicas de AP relacionadas com a variabilidade espacial das lavouras. (Fonte: adaptado de Molin 2017)

O reduzido número de estudos e de produtores que adotam sementes em taxa variável demonstra a carência da área em pesquisa e desenvolvimento. A existência de máquinas, controladores e tecnologia para disponibilizar a operação em campo é consolidada. Porém, ainda faltam critérios e conhecimento para recomendações eficientes de como utilizar a tecnologia frente os diversos tipos de solo, relevo e cultivares disponíveis no mercado.

Objetivos

Objetivo Geral

Identificar por meio da geoestatística em uma área conduzida no sistema de sucessão soja-milho por 15 anos, fatores de fertilidade do solo limitantes à produtividade da soja, bem como avaliar a possibilidade de variação da taxa de semeadura no desempenho da cultura da soja.

Objetivos Específicos

- Identificar, dentre os atributos químicos do solo e análise granulométrica, o mais limitante à produtividade de soja.
- Avaliar os parâmetros produtivos de uma cultivar de soja com médio potencial de ramificação em função da variação da densidade de semeadura em uma área de textura muito argilosa e área de textura argila arenosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SANCHES, R.B.; PAZETO, R.J.; SIQUEIRA, D.S. Dependência espacial dos custos de fertilizantes para aplicação em taxa variada em cana-de-açúcar. In: **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP**, 2008.

BLACKMORE, B.S.; GODWIN, R.J.; FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. **Biosystems Engineering**, v.84, p.455-466, 2003.

CAMPOS, M. C. C; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.297-304, 2009.

COELHO, A.M. Agricultura de precisão em sistemas agrícolas. In: FALEIRO, F.G.; FARIAS NETO, A.L. (Eds.). Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2008. p.1062-1080.

DELGADO, J.A.; BAUSCH, W.C. Potential use of precision conservation techniques to reduce nitrate leaching in irrigated crops. **Journal of Soil Water Conservation**, v. 60, n.6, p.379-387. 2005.

DELGADO, J.A.; GROSS, C.M.; LAL, H.; COVER, H.; GAGLIARDI, P.; McKINNEY, S.P.; HESKETH, E.; SHAFFER, M.J. A New GIS nitrogen trading tool concept for conservation and reduction of reactive nitrogen losses to the environment. **Advances in Agronomy**, v. 105, p. 117-171. 2010.

DU, Q.; CHANG, N.; YANG, C.; SRILAKSHMI, K.R. Combination of multispectral remote sensing, variable rate technology and environmental modeling for citrus pest management. **Journal of Environmental Management**, v. 86, n.1, p. 14-26. 2008.

ENGLISH, B.C.; ROBERTS, R.K.; LARSON, J.A. A logit analysis of precision farming technology adoption in Tennessee. **Department of Agricultural Economics**, 2000.

FULTON, J.P. Overview of variable-rate technology. Alabama: **Alabama Precision Ag Extension**, 2009a. (Precision Agriculture Series).

GOOGLE TRENDS - Interesse de pesquisa pelo termo “Precision Agriculture” nos últimos cinco anos segundo Google Trends (Janeiro/2018).

HEDLEY, C.B.; YULE, I.J. A high resolution soil water status mapping method for irrigation scheduling and two variable rate scenarios for pasture and maize irrigation. **9^o International Conference on Precision Agriculture**. 20-23 julho. 2008.

HURTADO, S.M.C.; RESENDE, A.V.; CORAZZA, E.J.; SHIRATSUCHI, L.S.; HIGASHIKAWA, F.S. Otimização da adubação em lavoura com altos teores de potássio no solo: uso de agricultura de precisão. In: **Simpósio nacional sobre cerrado**. 9. Embrapa Cerrados, Brasília – DF, 2008.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. O relevo na interpretação da variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.11, p.1152-1159, nov. 2010.

LOPES, F.A.; MOLIN, J.P. Adubação em doses variadas em citrus. In: **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP**: Ribeirão Preto, 2010..

LUCHIARI JUNIOR, A.; SHANAHAN, J.; LIEBIG, M.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D.; PAYTON, S. Strategies for Establishing Management Zones for Site Specific Nutrient Management. In: **International conference on precision agriculture**, 5., Minneapolis: University of Minnesota, 2000,

MACHADO, O. D. DA C.; ALONÇO, S. A.; BELLE, P. M.; FRANCK, J. C. Acurácia das semeadoras-adubadoras à taxa variável. **Ciência Rural**, v. 45, n. 7, p. 1205–1213, 2015a.

MÉNDEZ, A. Agricultura de precisión y máquinas precisas. Córdoba: **INTA Manfredi**, 2011. (PROYECTO AGRICULTURA DE PRECISIÓN).

MENEGATTI, L.A.A.; MOLIN, J.P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.126-134, 2004.

Missotten, B.; Strubbe, D. De Baerdemaeker, J. Accuracies of grain and straw yield maps. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.9, p.23-26, 1996.

MOLIN, J. P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. Disponível em:
<http://www.ler.esalq.usp.br/download/CLP%202000.01.PDF>. Acesso em: 20 Nov. 2017.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: Números do mercado brasileiro. **Agricultura de Precisão Boletim Técnico 03**, 2017.

PASZKIEWICZ, S.; BUTZEN, S. Corn hybrid response to plant population. **Pioneer Crop Insights**, v.17, n.16, p.1-4, 2007.

RESENDE, A. V. ; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J.M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. **REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**, 2010, Teresina. Novos caminhos para agricultura conservacionista no Brasil: anais. Teresina: Embrapa Meio-Norte: Universidade Federal do Piauí, 2010.

SANCHEZ, M. G. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; PEREIRA, G. T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, n. 2, p. 201-214, 2012.

SANTI, A.L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 150p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, C.B.; MORAES, M.A.F.D.; MOLIN, J.P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Prec. Agriculture**, p.1-15, 2010.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma** v. 155, 55-66, 2010.

TEKIN, A. B. Variable rate fertilizer application in Turkish wheat agriculture: economic assessment. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 8, p. 647-652, 2010.

CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com a revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB))

Geoestatística e mapa de colheita como ferramentas para identificação de atributos edáficos limitantes à produtividade de soja

Resumo – O trabalho tem como objetivo identificar atributos do solo que limitaram a produtividade de soja utilizando geoestatística e mapa de colheita. O trabalho foi realizado em uma área de 232 ha no município de Montividiu, sudoeste de Goiás. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0,0 – 0,2 m georreferenciadas e na densidade de 1 ponto ha⁻¹. Foi determinado o teor de argila e atributos químicos do solo. A produtividade foi medida por meio da colhedora. Os dados foram submetidos à análise estatística, multivariada e geoestatística para determinação da variabilidade espacial. O teor de argila, CTC, matéria orgânica e magnésio são os atributos limitantes à produtividade de soja nessa área.

Termos para indexação: Agricultura de precisão, variabilidade espacial, fertilidade do solo.

Geostatistics and yield map as tools to identify limiting edaphic attributes of soybean yield

Abstract – The study aims to identify soil attributes that limit the productivity of soybean using geostatistics and yield map. The study was carried out in an area of 232 ha in the city of Montividiu, southwest of Goiás. Soil samples were collected in the depth of 0.0 - 0.2 m georeferenced and with density of 1 point ha⁻¹. There were determined the clay content and the chemical attributes of the soil, and yield was measured through the harvester. The data were submitted to statistical, multivariate and geostatistical analysis to determine spatial variability. The content of clay, the capacity of cations exchange, organic matter and magnesium were the limiting attributes of soybean yield in this area.

Index Terms: Precision Agriculture, spatial variability, soil fertility

Introdução

A agricultura de precisão (AP) é uma técnica que através da identificação da variabilidade espacial dos atributos do solo e plantas, prescreve o manejo específico em zonas diferenciadas (Mallarino & Wittry, 2004; Grego & Vieira, 2005). Essas informações têm possibilitado o manejo da adubação e correção do solo em taxa variável e são ferramentas importantes para a análise da variabilidade de rendimento das culturas.

O manejo em zonas visa a correção de problemas e homogeneização da fertilidade do solo para obter aumento da produtividade. Porém, mesmo após anos de adoção da AP, é notória a disparidade de produtividade em um mesmo talhão ou fazenda. Essa disparidade é explicada pela alta complexidade do solo, que é um sistema dinâmico interagido por atributos físicos, químicos e biológicos (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Além disso, o sistema é intensamente afetado pelo homem, através da aplicação de fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas e remoção de nutrientes pelas colheitas.

Mapas de fertilidade e produtividade, dados climáticos e histórico da área muitas vezes quando analisados individualmente não são suficientes para a tomada de decisão, e a grande quantidade de dados dificulta uma análise multidisciplinar. Por outro lado, a correlação simples, análise fatorial e análise de componentes principais são ferramentas estatísticas que podem auxiliar na compreensão dessas interações entre atributos físico-químicos e biológicos (Shiratsuchi et al., 2007; Freddi et al., 2008; Nogara Neto et al., 2011). Essas análises são utilizadas para sumarizar o número de dados com objetivo de facilitar a interpretação e tomada de decisão para a recomendação agronômica.

A identificação de atributos do solo que limitam a produtividade é uma forma de tornar o manejo da lavoura mais eficiente e rentável. Essa estratégia pode auxiliar na escolha de um insumo específico, implemento de preparo do solo, ajustar recomendações agronômicas e direcionar investimentos para o aumento da produtividade.

Nesse contexto de alta tecnologia, busca constante por altas produtividades e grande quantidade de informações agronômicas, este trabalho tem o objetivo de utilizar a geoestatística e mapa de produtividade para identificar os atributos do solo limitantes à produtividade de soja cultivada a 15 anos sob agricultura de precisão.

Material e Métodos

Localização e caracterização da área

O trabalho foi realizado em uma área comercial de 232 ha, pertencente à Fazenda Tropical, no município de Montividiu, sudoeste de Goiás (Figura 1) - 17° 24' S e 51° 26' O, com altitude variando entre 880 e 950 metros. Segundo a classificação de Köppen, o clima é definido como tropical com estação seca (Aw). A precipitação média anual da região é de 1.740 mm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (Santos et al., 2006), e o teor de argila do solo varia entre 600 g dm⁻³ no topo da área até 200 g dm⁻³ nas partes mais baixas (figura 1).

A área está sob cultivo de soja e milho em sistema de plantio direto há 15 anos. A fazenda emprega alta tecnologia de mecanização, utilizando controles de piloto automático na semeadura, pulverização e colheita. A correção e adubação do solo é feita há 10 anos em taxa variável, através de tecnologias da agricultura de precisão. A conjuntura tecnológica empregada na fazenda promoveu aumentos sucessivos de produtividade nos últimos anos. Em um período de 4 safras, ocorreu na área ganho de 11 sacas de soja por hectare e 28 sacas de milho por hectare, atingindo a produtividade média de 79 sacas ha⁻¹ de soja na safra de 2016/17.

Malha de amostragem, coleta e análise do solo

Através de uma malha georreferenciada com intervalos regulares de 100 m, foram coletadas oito subamostras de solo na profundidade de 0,0 – 0,2 m para compor uma amostra composta (figura 1A). No total foram coletadas 232 amostras em 232 ha. A amostragem foi realizada após a colheita do milho segunda safra 2016/16. As amostras foram submetidas à análise química. O pH foi determinado potenciometricamente utilizando relação 1:2,5 de solo: água, solo: KCl mol L⁻¹ e solo: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis, e o fósforo disponível (P) foram extraídos utilizando o método da resina trocadora de íons (Raij et al., 1987). A acidez trocável (Al³⁺) foi determinada seguindo a metodologia de Raij & Zullo (1977), e o carbono orgânico de acordo com metodologias da EMBRAPA (1997).

Implantação da cultura e determinação da produtividade

A semeadura da soja foi realizada no dia 10 de outubro de 2016, com o solo em condição friável. Utilizou-se semeadora com sistema de distribuição de sementes pneumático e sulcador tipo disco. A cultivar adotada foi Brasmax Power IPRO, que

pertence ao grupo de maturação 7,3 com hábito de crescimento indeterminado e de médio potencial de ramificação. Foi utilizado uma população de 400.000 plantas ha⁻¹ com espaçamento entrelinhas de 0,5 m. A adubação foi realizada com 226 kg ha⁻¹ de 00-40-00 aplicado no sulco de semeadura e com 150 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio aplicado em superfície em taxa variável antes da semeadura da soja. Os tratos culturais foram feitos seguindo as recomendações técnicas da cultura da soja. A determinação da produtividade foi feita através de sensores nas colhedoras. As máquinas possuem sensores que quantificam a produtividade através de um sistema que executa as medições instantâneas de todo o fluxo de grão, por meio de um sensor de impacto. Outro sensor de umidade converte a produção colhida para kg de grão seco por hectare. Normalmente, é quantificado um ponto de produtividade georreferenciado a cada três segundos.

Análise estatística dos dados: análise descritiva, multivariada e geoestatística

Os dados foram submetidos à análise estatística para determinação da média, mediana, máximo, mínimo, coeficiente de variação e determinação do coeficiente de correlação de Pearson (r^2) entre cada par de variáveis estudadas, medindo o grau de relação linear entre as variáveis. Esta análise foi realizada no software estatístico Minitab 17.

Para melhor entendimento da correlação, os dados dos 232 pontos de amostragem de solo foram hierarquizados em cinco grupos com base no percentil da produtividade. Essa metodologia já foi utilizada por outros pesquisadores na identificação de áreas de manejo específico através da cor do solo (Carmo et al., 2016).

Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (Matheron, 1963; Vieira et al., 1983; Isaaks & Sristava, 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação 1:

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

sendo:

$\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar

claramente definido (Burrough & McDonnell, 2000) e o resultado da técnica de validação cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis, foi feita a interpolação dos dados por meio de krigagem. A análise geoestatística foi feita no software GS+ e a modelagem dos mapas no Surfer versão 8.00.

A análise dos componentes principais foi utilizada com o intuito de sumarizar o número de atributos estudados (Cooley et al., 1971; Johnson & Wichern, 2002). Esses componentes foram analisados através da combinação da correlação entre as variáveis e o seu valor foi atribuído de acordo com a sua contribuição na explicação da variação total dos dados (Silva et al., 2010). O critério utilizado na escolha dos componentes principais interpretados foi o percentual da variância explicada. Para cada componente principal, foi classificado os autovalores (valores que representam o peso de cada caractere que variam de -1 a +1): valor absoluto $<0,30$, classificado como pouco significativo; $0,30 - 0,40$, considerado mediantemente significativo; e $\geq 0,50$, tido como altamente significativo (Coelho, 2003). Posteriormente, realizou-se a análise de regressão dos atributos que apresentaram correlação na explicação da produtividade, sendo o modelo ajustado em função do valor de F e significância das equações.

Resultados e Discussão

O coeficiente de variação (CV), de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), revelou baixa variabilidade para o teor de matéria orgânica, pH e produtividade de grãos ($CV < 12\%$). O pH apresentou valor médio de 5,19 (Tabela 1) valor considerado adequado e que não indisponibiliza a absorção dos nutrientes pelas plantas (Sousa & Lobato 2004). A M.O com valor médio de $38,45 \text{ g dm}^{-3}$ também se encontra em nível adequado no solo (Sousa & Lobato, 2004).

Para a produtividade, foi encontrado valor baixo do coeficiente de variação (9,08%) e com média de 79 sacas ha^{-1} . A análise indica que a área está em um elevado patamar de produtividade quando comparado a média nacional de 56 sacas ha^{-1} (CONAB, 2017). Porém, os valores mínimos e máximos (55 e 92 respectivamente) demonstram que a área possui pontos com grande diferença de produtividade e que necessita de uma análise espacial e multidisciplinar para a determinação dos atributos que limitam a produtividade.

Os maiores CV foram constatados para os teores de P, K, Ca, Mg, S, Al ($CV > 24\%$). Os valores do CV das propriedades químicas são maiores que das granulométricas, concordando com Souza et al. (1997) e Marques Júnior & Cora

(1998). O alto valor de CV para esses atributos se deve ao fato de serem intensamente manejados através da aplicação de fertilizantes, extração por colheitas e pela especificidade dos nutrientes no solo.

Valores altos de CV para o P também foram encontrados por Souza et al. (1997) e Carvalho et al. (2002). Esta elevada variação é explicada através das linhas de adubação (Salet et al, 1997), baixa mobilidade no solo (Barber, 1984) e sua baixa disponibilidade em solos oxídicos (Novais et al, 2007). Os valores de mínimo e máximo (7,18 e 52,76) mostraram a importância da adubação em taxa variável e que a recomendação por média não é uma estratégia adequada. A adubação fosfatada adotada na área está muito acima do necessário. O solo encontra-se em teor corrigido (média de 23 mg dm^{-3}) e a cultura da soja exporta 12 kg ha^{-1} de P_2O_5 por tonelada de grãos (Sfredo, 2008), portanto para a produtividade atingida a aplicação de 150 kg ha^{-1} de 00-40-00 forneceria 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 que seria suficiente para a manutenção do fósforo no solo.

Dentre os nutrientes que apresentaram elevado CV, apenas o Mg apresentou valor médio ($0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) que é considerado próximo ao nível baixo (Sousa & Lobato 2004). A manutenção do Mg no solo é um desafio pela pouca diversidade de insumo e fontes. Além da elevada exportação de Mg pelas colheitas de soja e milho, o nutriente também é perdido no sistema por lixiviação (Caires et al., 2004)

Os atributos argila, CTC e saturação de bases tiveram variação moderada (12% a 24%) e apresentaram valores médios (Tabela 1) adequados segundo a classificação de Sousa & Lobato (2004). O elevado CV para a maioria dos atributos do solo evidencia a alta variabilidade nos dados, justificando a utilização da geoestatística para melhor entendimento da relação de causa e efeito entre os atributos do solo e produção.

Os atributos Argila, CTC, Matéria Orgânica, Ca, Mg e SB obtiveram correlação positiva com a produtividade e grupos de produtividade pelo teste t-student (Tabela 2), ou seja, quanto maior o teor desses atributos no solo, maior também foi a produtividade de soja. O teor de argila apresentou a maior correlação, e indica que foi o atributo que mais interferiu na produtividade.

As partículas de argila são importantes para a formação dos microporos, que, dentre outros fatores, são responsáveis pelo armazenamento de água do solo (Vieira et al., 1988). A microporosidade, por estar relacionada com a água do solo, influencia no desenvolvimento das plantas, especialmente nas épocas críticas de estresse hídrico. Diversos trabalhos contemplam a elevada correlação entre a textura do solo e

produtividade de culturas (Miranda & Volkweiss, 1981; van Laar, 1981; Gerhardt et al., 2001; Bedin et al., 2003); esses trabalhos também ressaltam a importância da argila na avaliação da qualidade da terra para uso agrícola.

Outros trabalhos também apresentaram correlações lineares baixas (menor que 0,5) dos atributos da fertilidade do solo com a produtividade (Montezano et al., 2006; SILVA et al., 2015). Foi verificado por esses autores que fatores bióticos e abióticos como ataques de insetos, doenças e o clima, influenciam na produtividade e que neste trabalho não foram avaliados.

Pela análise de geoestatística (Tabela 3), todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial. A variabilidade ao acaso pode ser indicada pelo efeito pepita (C_0), considerando a distância de amostragem utilizada (Cambardella et al., 1994). A relação entre o patamar (C_0+C_1) e o efeito pepita (C_0) do semivariograma revela o grau de dependência espacial dos atributos (Trangmar et al., 1985).

Segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), o teor de argila apresentou grau de dependência espacial forte [$C_0/(C_0+C_1) < 25\%$], e o baixo valor do efeito pepita ($C_0 = 0,1$) significa que a variabilidade do atributo não ocorre ao acaso. Com exceção da argila, todos os outros atributos analisados apresentaram grau de dependência espacial moderada [$C_0/(C_0+C_1) > 25\%$ e $< 70\%$].

Para a modelagem dos semivariogramas, foram ajustados os modelos exponencial, gaussiano e esférico. Segundo Mcbratney & Webster (1986), os modelos esférico e exponencial são os semivariogramas mais encontrados para o mapeamento dos atributos do solo. De acordo com Cambardella et al. (1994), para descrever o comportamento de atributos de planta e do solo o modelo esférico é o mais adequado.

Alguns pesquisadores (Burguess & Webster, 1980; Burguess et al., 1981) relatam que o modelo esférico é utilizado para modelar atributos que são facilmente identificados no campo e que apresentam transições abruptas. Os modelos exponenciais e gaussianos são utilizados para representar atributos que possuem transição mais sutil, assim como é observado em sua estrutura; logo, são atributos que a identificação da transição de classes no campo é mais difícil. Para os atributos argila, CTC e Mg, ajustou-se o modelo gaussiano; modelo exponencial para os atributos produtividade e H+Al, e para M.O, SB e Ca ajustou-se o modelo gaussiano.

Os atributos estudados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial. O parâmetro alcance é o principal fator analisado na geoestatística, ele representa a distância da continuidade espacial de uma variável, depois dessa distância os valores

espaciais do atributo são aleatórios e não possuem mais relação entre si (Vieira, 2000). O alcance também aponta a distância mínima entre amostras para que seja possível uma segura modelagem da variabilidade espacial de um atributo através da krigagem. Molin et al. (2015) sugerem que essa distância deve ser a metade ou igual ao valor do alcance.

Os maiores alcances foram para os atributos SB, Ca e Mg, provavelmente pela maior continuidade espacial. As aplicações de calcário em taxa variável durante anos corrigiram o solo e forneceram Ca e Mg visando o equilíbrio e homogeneidade da área. A CTC e Argila são atributos intrínsecos do solo e que sofrem menor interferência do manejo do homem, portanto o alcance dificilmente será alterado com o passar dos anos. O alcance para o teor de argila encontrado foi de 424 m. Essa informação sugere que em futuros trabalhos nas mesmas condições, pode ser coletado uma amostra de solo a cada 424 m ou 1 ponto a cada 18 hectares para caracterizar a variabilidade espacial do teor de argila.

Para visualizar a distribuição espacial dos atributos que obtiveram correlação significativa com a produtividade, foi construído o mapa de krigagem (Figura 2). Os mapas confirmam o elevado grau de dependência espacial desses atributos e a correlação positiva com a produtividade.

A face norte do mapa apresenta os maiores teores de argila, CTC, M.O e as maiores produtividades estão próximas dessas áreas. As faixas de variabilidade bem definidas e ausência de manchas aleatórias demonstram o elevado grau de dependência espacial. A região inferior do mapa apresenta teores inferiores de argila, CTC, M.O e produtividade.

A análise de componentes principais (CP) agrupou os atributos químicos do solo e a argila em quatro grupos (Figura 3), de modo que o ajuste do modelo foi capaz de explicar 75,2% das variâncias dos atributos. Cada atributo do solo apresentou uma correlação com cada um dos 4 principais fatores selecionados. Assim, cada fator tem a capacidade de expressar o atributo que pode estar mais interferindo no sistema de produção, isto é, o atributo que pode estar limitando a produtividade.

A primeira componente principal representa 37,5% da variância total e obteve correlação positiva mediantemente significativa com os atributos CTC, V%, Ca, Mg e SB (tabela 4), sendo que a SB e o Mg apresentaram os maiores valores (0,41 e 0,38 respectivamente). Quimicamente, as bases são essenciais para a produção das culturas, e em um Latossolo Vermelho distroférico (semelhante ao da área de estudo) foi identificado que as relações equilibradas dos nutrientes Mg, Ca e K aumentou a

produtividade da cultura da soja (Watanabe et al. 2005). Estudos indicam que a relação K:Mg:Ca para estar em nível adequado para a cultura da soja e em equilíbrio no solo, deve ser mantida entre 1:3:9 a 1:5:25 (Vitti & Trevisan, 2000).

A CP2 com a proporção acumulada representa 58% da variância total, e a H+Al, MO, CTC, Al e argila foram os atributos com maior correlação dentro da CP2, sendo que a H+Al apresentou o maior valor (0,43). Especificamente, os atributos H+Al e Al são indicadores de acidez e provavelmente estão ocupando os sítios de troca de cátions, pois para essa CP, as bases apresentaram valores de correlação muito baixos e a indisponibilidade de nutrientes na solução do solo é um fator que afeta a nutrição e produtividade das culturas. O Al provoca efeito negativo no crescimento do sistema radicular, aumenta o diâmetro das raízes e reduz a quantidade de raízes laterais responsáveis por absorver água e nutrientes (Sediyama, 2016).

O diagrama apresentado na figura 4, auxilia na interpretação da tabela de análise de componentes principais. Como foi apresentado no Teste t-student e mapas de variabilidade, o Mg e a CTC foram os atributos que se destacaram na explicação da variabilidade da produtividade. Em contrapartida, o gráfico apresenta mesmo com um baixo valor, o atributo S apresentou correlação negativa quando comparado as bases do solo na CP2; informação essa que não havia sido identificada nas análises anteriores. Isso provavelmente ocorreu pelo fato do S ser um nutriente que no solo é oxidado a sulfato, e este por ter cargas negativas provoca a lixiviação de bases como o Mg, ocorrido pelas aplicações de gesso agrícola no passado. Estudos com aplicação de gesso no solo obtiveram resultados frequentes da ocorrência de lixiviação de Mg (Carvalho et al., 1986; Ernani et al., 2001). Caires et al. (1999) observou que a aplicação de gesso no solo após oito meses aumentou os teores de cálcio e provocou lixiviação de magnésio e potássio das camadas superficiais para as mais profundas.

Para confirmar as correlações obtidas pelo Teste t-student (tabela 2), mapas de variabilidade espacial e análise de componentes principais, realizou-se a análise de regressão dos atributos do solo com a produtividade (figura 5). Esta análise verifica a existência de uma relação funcional entre as variáveis. O modelo linear foi ajustado para todos os atributos do solo com a produtividade. O elevado coeficiente de determinação (R^2) encontrado para todos os atributos indica o bom ajuste dos dados ao modelo linear.

A equação modelada para o teor de argila desta área, obteve um coeficiente angular de 1,78, isso significa que um incremento de 10 g dm^{-3} no teor de argila do solo

é responsável pelo incremento da produtividade de soja em 17 sc ha⁻¹. A argila é um atributo fruto dos processos e fatores de formação do solo, por isso não é possível promover o incremento na área para melhoria do sistema de produção. A análise de regressão confirma a correlação encontrada na tabela 1.

A regressão do teor de matéria orgânica com a produtividade apresentou coeficiente angular de 6,63. Solos com menor concentração de nutrientes e de matéria orgânica afetam a produtividade das culturas (Preve & Martens 1990). O sistema de plantio direto (SPD) é uma tecnologia que fundamenta a sustentabilidade dos sistemas de produção (Cavaliere et al., 2006) e que também é capaz de incrementar ganhos de produtividade (Santos et al., 2008). O SPD eleva os estoques de matéria orgânica em amplitude dependente do tipo de solo e condições climáticas (Balesdent et al., 2000). A formação de palhada e aumento do teor de matéria orgânica em solos arenosos são menores do que em solos argilosos. A estatística descritiva e os mapas de variabilidade demonstram que na área estudada, as regiões arenosas possuem os menores teores de matéria orgânica.

A capacidade de troca de cátions apresentou coeficiente angular de 24,19. A matéria orgânica do solo é responsável por 75 a 90% da CTC em solos de regiões tropicais e subtropicais (Bortoluzzi et al., 2009), informação que confirma a semelhança entre os mapas de variabilidade. A CTC do solo representa a capacidade do mesmo em reter nutrientes, por isso é uma característica fundamental para a adoção das estratégias de manejo da fertilidade do solo (Raij, 2011). A equação da regressão indica que o aumento de 1,5 cmol_c dm⁻³ na CTC do solo representou incremento de 24 sc ha⁻¹ na produção da soja.

A regressão do teor de Mg do solo com a produtividade apresentou coeficiente angular de 125,89. A equação da regressão apresentou que as áreas que possuíam 0,2 cmol_c dm⁻³ a mais de Mg no solo produziram 25 sc ha⁻¹ a mais. O teor médio da área apresentado na estatística descritiva foi de 0,61 cmol_c dm⁻³, que é considerado abaixo do nível crítico (0,8 cmol_c dm⁻³) em solos com CTC menor que 8 cmol_c dm⁻³ (Borkert et al., 2006). Apesar do teor médio estar abaixo do nível crítico, foi determinado amostras com 0,18 e 1,8 cmol_c dm⁻³, essa variação foi suficiente para correlacionar com a produtividade. O magnésio é um nutriente constituinte da clorofila e fundamental nos processos de fotossíntese, é ativador das enzimas nas plantas e responsável pela síntese de carboidratos e proteínas (Sfredo, 2008).

A baixa correlação verificada para o K com a produtividade e sua baixa contribuição para as componentes principais demonstram que a dose de cloreto de potássio está adequada e a aplicação em taxa variável está sendo eficiente em atender a necessidade do solo e das plantas.

Através das informações obtidas pela análise de solo e estatística, poderia ser reduzido o investimento da propriedade em adubação fosfatada e a utilização do mesmo para a obtenção de fertilizantes com fonte de magnésio ou calcário com maior concentração desse nutriente. De tal modo é possível gerir a fertilidade do solo com mais eficiência, criando oportunidades para o incremento de produtividade sem o desembolso com novos produtos, serviços ou tecnologias, apenas utilizando informações da própria lavoura.

Conclusões

A geoestatística e mapa de colheita são ferramentas eficientes no mapeamento da variabilidade espacial dos atributos do solo e foram capazes de identificar os atributos limitantes da produtividade da soja.

O teor de argila, CTC, matéria orgânica e magnésio são os atributos que limitaram a produtividade de soja nessa área.

A integração de ferramentas da agricultura de precisão com análises estatísticas propicia melhor entendimento das relações do sistema de produção, e pode ser utilizada a fim de refinar o planejamento de safras.

Agradecimentos

À Capes, pela concessão da bolsa. À Fazenda Tropical, que disponibilizou a área de estudo, custeou as análises e deu total suporte logístico.

Referências

- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, v.53, p.215-230, 2000.
- BARBER, S. A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. New York, **John Wiley and Sons**, 1984, 398p.
- BEDIN, I.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; FAQUIN, V.; TOKURA, A.M. & SANTOS, J.Z.L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes

capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:639- 646, 2003.

BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. de. Estabelecimento das relações entre Ca, Mg e K para soja, em solo de Cerrado. In: **Reunião de pesquisa de soja da região central do brasil**, 28., 2006, Uberaba. Resumos... Londrina: Embrapa Soja: Fundação Meridional: Fundação Triângulo, 2006a. p. 428-429 (Embrapa Soja. Documentos, 272).

BORTOLUZZI, E.C.; RHEINHEIMER, D.S.; PETRY, C.; KAMINSKI, J. Contribuição de constituintes de solo à capacidade de troca de cátions obtida por diferentes métodos de extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 507-515, 2009.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, pp. 315-331, 1980.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A.B. Optimal interpolation and isarithm mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.4, pp. 643-659, 1981.

BURROUGH, P. A.; McDONNEL, R. A. Principles of geographical information systems. **Oxford: University Press**, 2000.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.315-327, 1999b.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, pp.1501-1511, 1994.

CARMO, D.A.B; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D.S; BAHIA, A.S; RABELO DE SOUZA; SANTOS, H.M; POLLO, G.Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 51, n. 9, p. 1261-1271, 2016 .

CARVALHO, L. J. C. B.; GOMIDE, R. L.; RODRIGUES, G. C.; SOUSA, D. M. G. & FREITAS Jr., E. Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solos de cerrado. In: **Seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura**, 1, 1986, Brasília. Anais... Brasília: EMBRAPA-DDT, 1986. p.61-83.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v.37, n.8, pp. 1151-1159, 2002.

CAVALIERI, K. M. V.; Tormena, C. A.; Vidigal Filho, P. S.; Gonçalves, A. C. A.; Costa, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.137-147, 2006.

COELHO, A.M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M. de; LOPES, A.S.; ALVARES V., V.H. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2003. v.3, p.259-290.

COOLEY, W. W.; LOHNES, P. R. **Multivariate data analysis**. New York: Wiley, 1971.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, **Ministério da Agricultura**, pp. 212, 1997.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. de; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. & 44 NEVES, J. C. L. (Eds). Fertilidade do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.551-594.

FREDDI, O. da S.; FERRAUDO, A.S.; CENTURION, J.F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.953-961, 2008.

GERHARDT, E.J.; FINGER, C.A.G.; LONGHI, S.J. & SCHUMACHER, M.V. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria augustifolia* (Bert.) O. Ktze., baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. **Ciência Rural**, 11:41-57, 2001.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.169-177, 2005.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. **New York: Oxford University Press**, pp. 561, 1989.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W.. Applied multivariate analysis. 5. ed. **Prentice Hall, Upper Saddle River**, NJ, 2002.

MALLARINO, A.P.; WITTRY, D. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. **Precision Agriculture**, v.5, p.131-144, 2004.

MARQUES JÚNIOR, J.; CORA, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão In: Mecanização e agricultura de precisão. Poços de Caldas: **UFPA/SBEA**. v.1, pp. 31-37, 1998.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, pp. 1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.37, pp. 617-639, 1986.

MIRANDA, L.N. & VOLKWEISS, S.J. Relações entre a resposta da soja à adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 5:58-63, 1981.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.

NOGARA NETO, F.; ROLOFF, G.; DIECKOW, J.; MOTTA, A.C.V. Atributos de solo e cultura espacialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1025-1036, 2011.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C. L. Fertilidade do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 471-537. 2007.

PREVE, R.E.; MARTENS, D.C. Potential effect of land-leveling on soil fertility in a Brazilian rice soil. **Plant Soil**, v.121, p.148-150, 1990.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: **IPNI**, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van & ZULLO, M.A.T. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, **Instituto Agrônomo**, 1977. 16 p (Circular, 63)

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, J.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S. & BATAGLIA, O. C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, **Fundação Cargill**, pp. 170, 1987.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A.; KRAY, C. H.; CONTE, E. Como fazer uma amostragem de solo no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2., 1997, Passo Fundo. **Anais... Passo Fundo: EmbrapaCNPT**, 1997. p. 205-207.

SANTOS, G. G.; SILVEIRA, P. M.; MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BALBINO, L. C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um latossolo vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.115-122, 2008

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília: **Embrapa**, 2006. 306p.

SEDIYAMA, T. Produtividade da soja. Londrina: **Mecenas**, 2016. 309 p.

SFREDO, G. J. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral. Londrina: **Embrapa Soja**, 2008. 147 p.

SHIRATSUCHI, L.S.; MARCHÃO, R.L.; JERKE, C.; RESENDE, A.V.; FONTES, J.R.A.; OLIVEIRA, C.M. de; VILELA, M. de F.; SÁ, M.A.C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D.G. dos; HURTADO, S.M.C. Geração de mapas multitemáticos em agricultura deprecisão. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 22p. (Embrapa Cerrados. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 181).

SILVA, S. de A.; LIMA, J.S. de S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.15-22, 2010.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015.

SOUSA, D.M. & LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, **Embrapa Informação Tecnológica**, 2004. 416p.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, pp. 367-372, 1997.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, pp. 45-93, 1985.

VAN LAAR, A. Biomass parameters in studies of the effect of site and silviculture on production. In: **IUFRO WORLD CONGRESS**, 17., Kyto, 1981. Proceedings. Kyto, 1981. p.120-124.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743-755, 2009.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. dos; VIEIRA, N. F. Solos: propriedades, classificação e manejo. Brasília: **MEC/ABEAS**, 1988.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia, Berkeley**, v.51, pp.1-75, 1983.

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

VITTI, G.C. & TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade de soja. Informações Agronômicas. Piracicaba, **POTAFÓS**, 2000. 16p. (Encarte Técnico, 90)

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, Cap.2, p. 319-344, 1980.

WATANABE, R.T.; FIORETTO, R.A.; FONSECA, I.B. da; SEIFERT, A.L.; SANTIAGO, D.C.; CRESTE, J.E.; HARADA, A.; CUCOLOTTO, M. Produtividade da cultura de soja em função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, p.477-484, 2005.

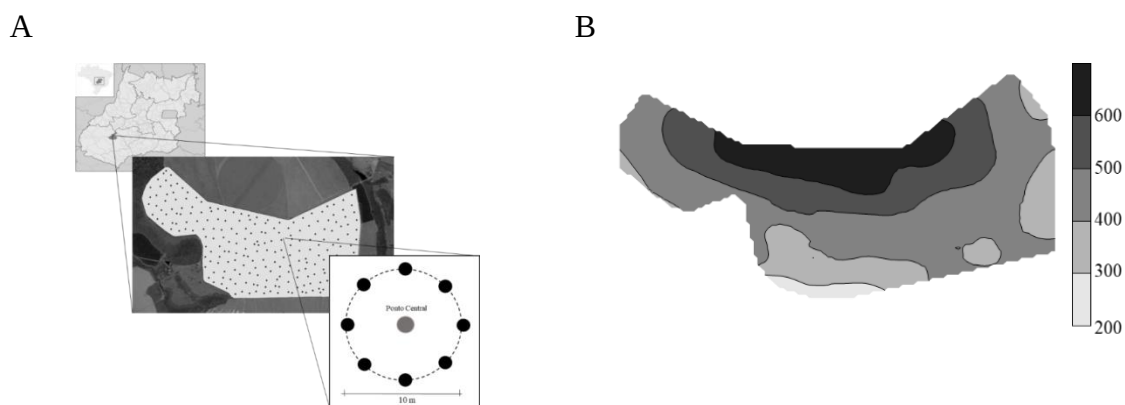


Figura 1. Localização da área e malha de amostragem (A); Teor de argila ($g\ kg^{-1}$) (B).

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo e produtividade.

Atributos	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	CV (%)
Argila ($g\ kg^{-1}$)	460,72	220,00	650,00	9,57	20,48
CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	7,10	4,56	11,56	1,29	18,18
MO ($g\ dm^{-3}$)	38,45	24,33	49,69	4,36	11,35
P ($mg\ dm^{-3}$)	23,17	7,18	52,76	7,88	34,02
pH ($CaCl_2$)	5,19	4,40	6,30	0,27	5,27
K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,16	0,02	0,67	0,08	51,08
Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	3,46	1,38	8,04	1,12	32,36
Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,61	0,18	1,80	0,25	40,17
S ($mg\ dm^{-3}$)	12,32	4,46	51,65	6,08	49,30
Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,08	0,02	0,29	0,04	51,65
H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$)	2,88	1,12	5,50	0,62	21,70
SB ($cmol_c\ dm^{-3}$)	4,23	1,70	9,30	1,33	31,47
V%	57,67	30,81	89,24	9,78	16,95
Produtividade ($sc\ ha^{-1}$)	79,87	55,31	92,32	7,25	9,08

Tabela 2. Correlação da produtividade e grupos de produtividade com os atributos do solo.

Atributos do Solo	Produtividade	Grupos de Produtividade
Argila (g kg^{-1})	0,348**	0,355**
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,234**	0,203**
MO (g dm^{-3})	0,189**	0,189**
P (mg dm^{-3})	0,065 ^{ns}	0,055 ^{ns}
pH (CaCl_2)	-0,022 ^{ns}	0,001 ^{ns}
K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,094 ^{ns}	0,117 ^{ns}
Ca ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,133*	0,09 ^{ns}
Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,208**	0,206*
S (mg dm^{-3})	0,018 ^{ns}	0,062 ^{ns}
Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,009 ^{ns}	0,013 ^{ns}
H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,151 ^{ns}	0,163 ^{ns}
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,156*	0,121*
V%	0,055 ^{ns}	0,045 ^{ns}

*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t-student;

**Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste t-student;

^{ns} Não significativo.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE (%)	Alcance (m)	r ²	Validação Cruzada		
							Intercept	r ²	Coef. Regres
Produtividade	Exponencial	12.90	31.15	41	519	0.95	-17.61	0.48	1.21
Grupos de Produtividade	Exponencial	0.74	2.13	35	424	0.84	-0.60	0.59	1.18
Argila	Gaussiano	0.10	128.50	0	467	0.95	0.76	0.94	0.98
Matéria Orgânica	Esférico	8.11	22.57	36	949	0.97	0.11	0.39	0.99
CTC	Gaussiano	0.92	2.18	42	569	0.98	0.05	0.36	0.99
Magnésio	Gaussiano	0.04	0.09	46	1038	0.99	0.10	0.19	0.83
Cálcio	Esférico	0.67	1.45	46	1240	0.98	0.33	0.26	0.90
SB	Esférico	1.03	2.25	46	1367	0.99	0.46	0.25	0.89

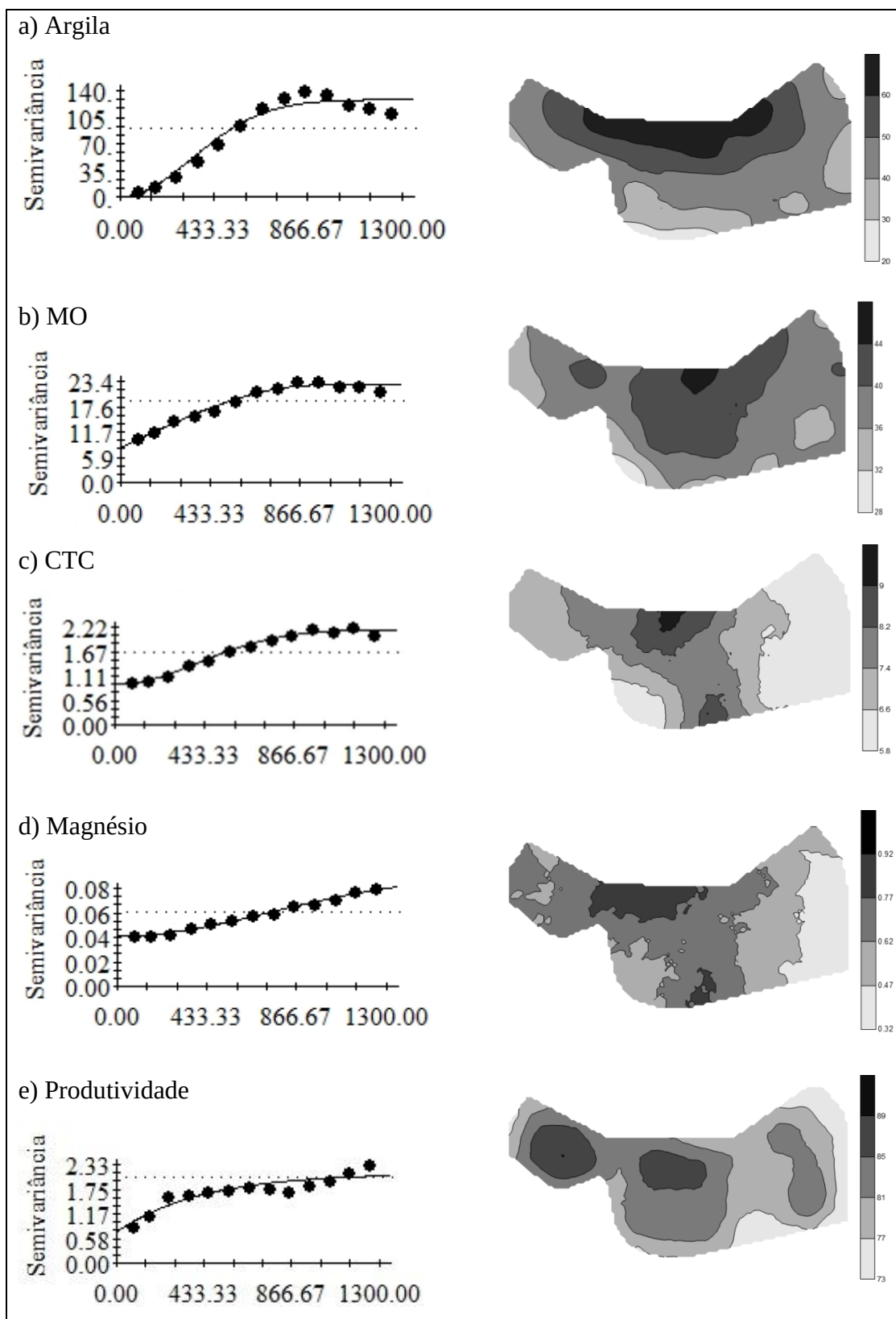


Figura 2. Semivariogramas e mapas dos atributos do solo e produtividade.

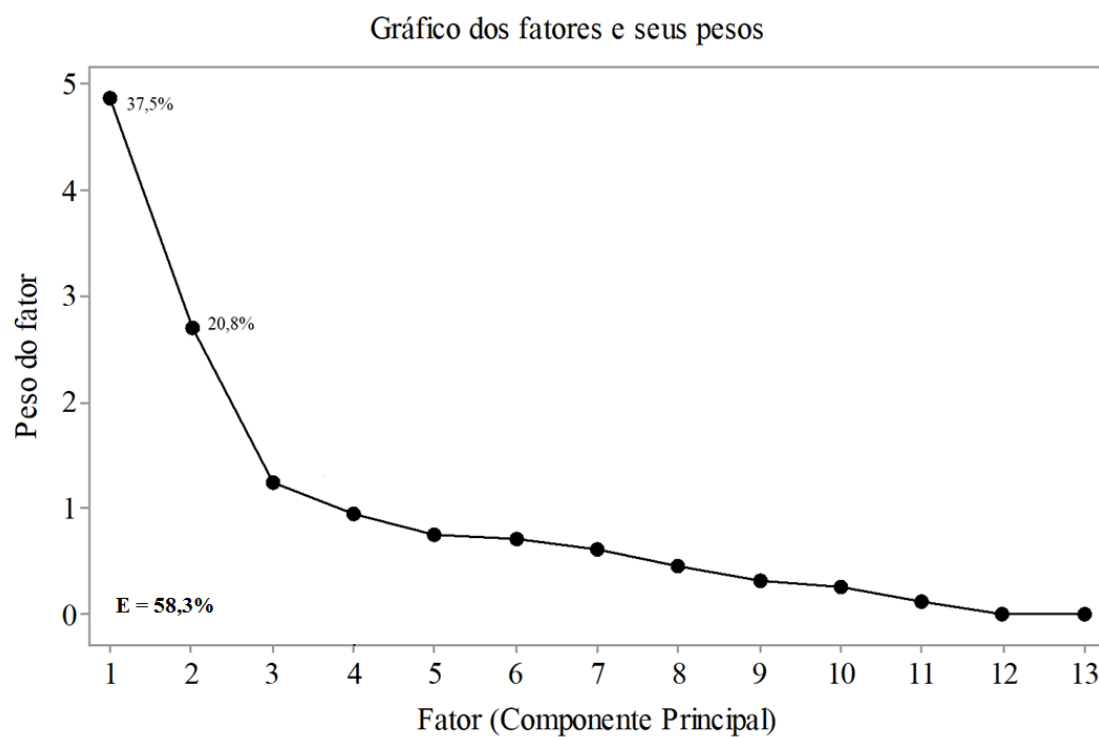


Figura 3. Gráfico dos fatores, seus pesos e a porcentagem de variância total explicada. Em que CP1= 37,5%; CP2= 20,8%.

Tabela 4. Caracteres com maiores cargas fatoriais (escores) selecionadas dentro de cada fator.

Componentes da variância	Componentes principais	
	CP1	CP2
Autovalores	4.8775	2.7045
Proporção	38%	21%
Proporção acumulada	38%	58%
Variáveis	Correlação com os componentes principais	
MO	0,080	0,375 ^(*)
CTC	0,316 ^(*)	0,37 ^(*)
P	0,15	-0,003
pH	0,292	-0,341
V%	0,377 ^(*)	-0,202
Ca	0,392 ^(*)	0,152
Mg	0,387 ^(*)	0,085
K	0,218	0,156
Al	-0,182	0,32 ^(*)
S	-0,148	0,281
H+Al	-0,229	0,439 ^(*)
SB	0,414 ^(*)	0,153
Argila	0,119	0,334 ^(*)

O critério para classificação foi: valor absoluto <0,30, considerado pouco significativo; 0,30–0,40, mediantemente significativo^(*); e $\geq 0,50$, altamente significativo^(**), de acordo com Coelho (2003).

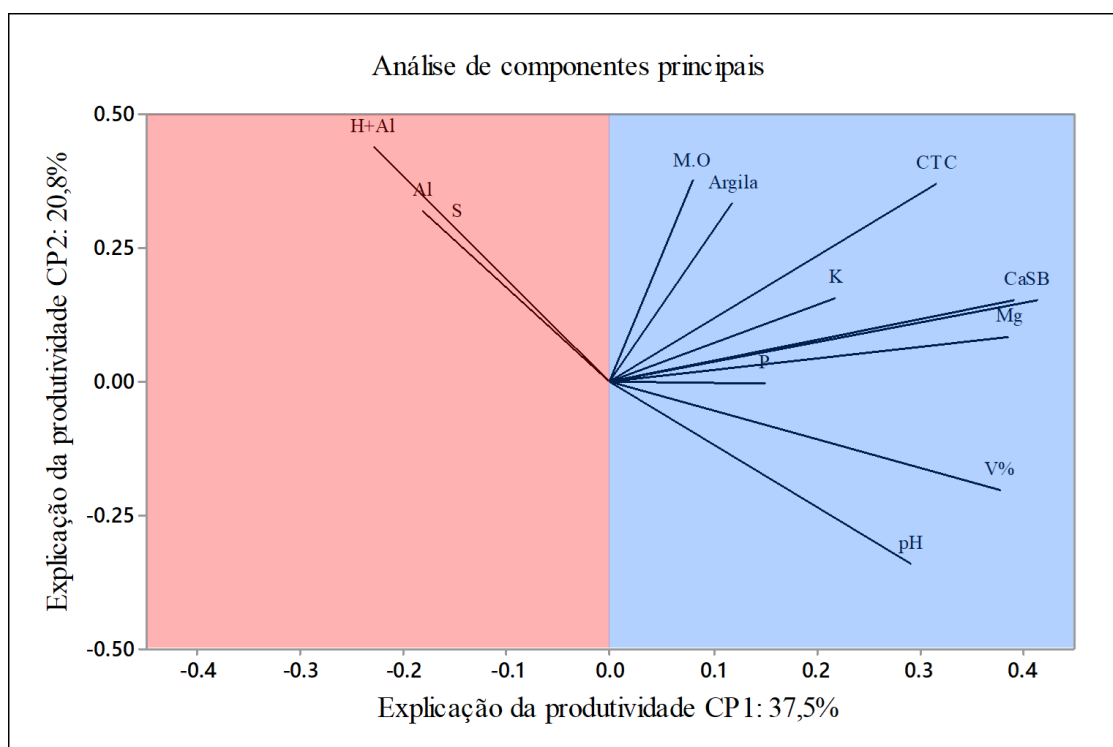
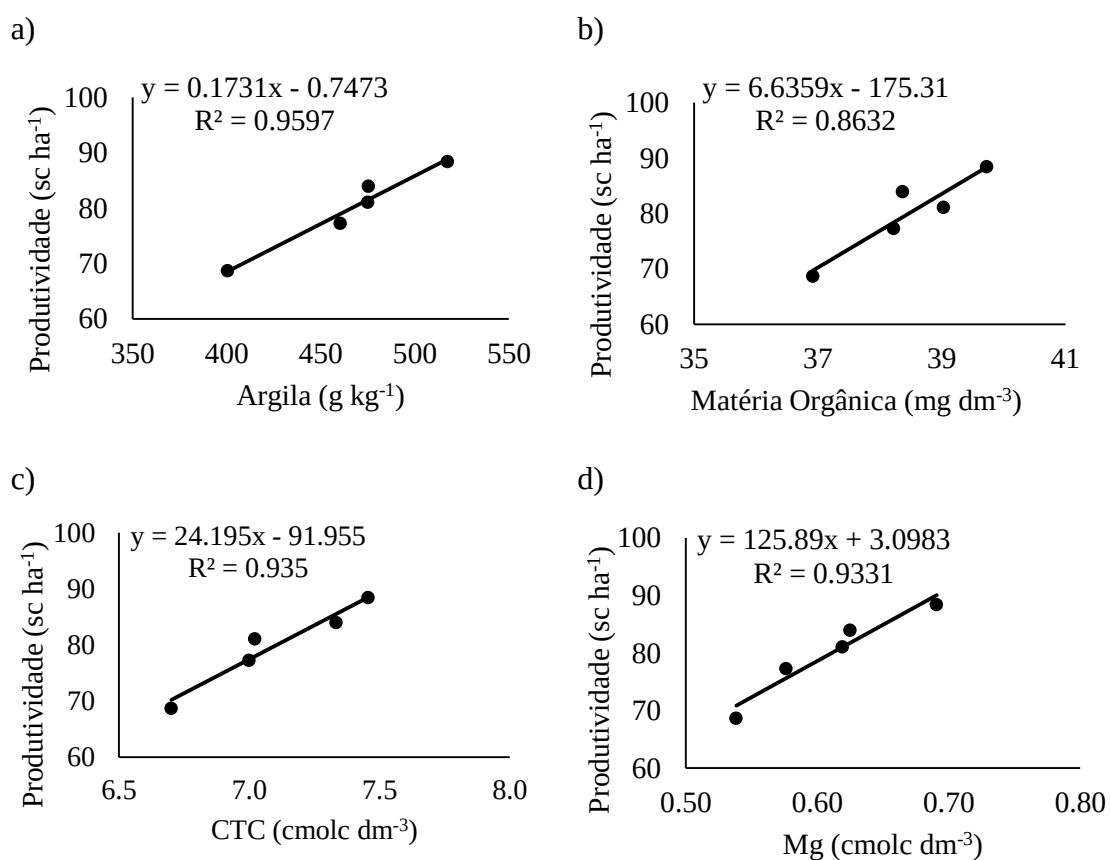


Figura 4. Diagrama da ordenação da análise de componentes principais dos atributos químicos e argila do solo.

Figura 5. Análise de regressão dos atributos do solo com grupos de produtividade



CAPÍTULO II

Parâmetros produtivos de uma cultivar de soja sob diferentes densidades de semeadura em áreas com textura muito argilosa e textura argila arenosa

Resumo – O objetivo do trabalho foi avaliar os parâmetros produtivos de uma cultivar de soja com médio potencial de ramificação em função da variação da densidade de semeadura em áreas com texturas contrastantes. No município de Montividiu – GO foram conduzidos dois experimentos, um em área de textura muito argilosa e outro em área de textura argila arenosa. Foi semeada a cultivar Brasmax Power IPRO com densidade de 600.000 sementes ha^{-1} . Em estágio V2 foi feito o desbaste para ajuste dos tratamentos: 240, 300, 360, 420 e 480 mil plantas ha^{-1} . Foi avaliada a altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de ramos, número de vagens, número de grãos e produtividade. Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão. Na área muito argilosa a variação da densidade de semeadura não resultou em diferença de produtividade. Na área argilosa, recomenda-se utilizar uma população de 388 mil plantas ha^{-1} para obtenção da maior produtividade para essa cultivar.

Productive parameters of a soybean cultivar under different variation of sowing density in areas with clayey and sandy clay texture

ABSTRACT – The aim of this study was to evaluate the productive parameters of a soybean cultivar with a medium potential of branching in function of the variation of sowing density in areas with contrasting textures. In the city of Montividiu - GO two experiments were carried out from October to February 2017, one in a very clayey texture area and the other in a clayey texture area. The variety Brasmax Power IPRO was sowed with density of 600.000 seeds ha^{-1} . In the V2 stage the thinning was done to adjust the treatments: 240, 300, 360, 420 and 480 thousand plants ha^{-1} . The plant height, height of insertion of the first string bean, number of branches, number of pods, number of grains and yield were evaluated. Data were submitted to analysis of variance and regression. In the very clayey area the variation of the sowing density did not result in different yield. In the clayey area it is recommended to use a population of 388 thousand plants ha^{-1} to obtain the highest yield for this variety.

Introdução

A produção de soja brasileira atingiu o recorde de 110 milhões de toneladas em 33 milhões de hectares cultivados na safra 2016/2017 (CONAB, 2017). Diversos fatores contribuíram para que o país atingisse esse novo patamar: clima favorável, potencial genético, adubação eficiente, modernização da mecanização e agricultura de precisão (AP).

Apesar dos estudos da viabilidade econômica da AP no Brasil serem poucos, a adoção dessa ferramenta tem mostrado ser altamente rentável e responsável por ganhos de produtividade em soja e milho (Silva et al., 2007). Porém, dentro do extenso portfólio da AP, existem tecnologias que são ainda inexploradas ou não possuem critérios estudados para recomendações, como o caso da semeadura em taxa variável (TV) para cultura da soja.

A soja é uma espécie que possui alta plasticidade de resposta a diferentes arranjos populacionais, que se dá pela capacidade da planta em variar o número de ramos, de vagens e de grãos de maneira inversamente proporcional à variação na população de plantas, e pode resultar em compensação no rendimento de grãos (Peixoto et al., 2000; Vazquez et al., 2008). Visando aumentos na rentabilidade, a redução do espaçamento entre linhas e da população padrão recomendada têm se mostrado manejos eficientes economicamente (De Bruin & Pedersen, 2008).

Diante essa característica de compensação aos diferentes arranjos populacionais, há algum tempo foi desenvolvido a tecnologia de semeadura em TV. Existem diversos sistemas disponíveis no mercado, inclusive vários trabalhos discutem a acurácia da taxa variável de sementes na semeadura (Shearer et al. 2002; Schumann et al. 2006; Fulton et al. 2007). Apesar da tecnologia avançada e sistemas disponíveis, os critérios para prescrição de semeadura em TV são praticamente inexistentes no meio científico e comercial.

É notório que para variar a população de soja, além do cultivar é necessário considerar o solo e relevo (Uhry, 2013). Na cultura do milho, utilizando TV, as maiores populações de plantas obtiveram menor produtividade comparada com a população uniforme (Molin et al., 2006), a população total de plantas impacta em aproximadamente 40% na produtividade (Vieira Junior et al., 2004). Estudos envolvendo população máxima e mínima de soja e milho considerando os genótipos, ambientes, textura do solo e fertilidade ainda são escassos.

Assim, objetivou-se avaliar os parâmetros produtivos de uma cultivar de soja com médio potencial de ramificação em função da variação da densidade de semeadura em áreas com texturas contrastantes.

Material e Métodos

Localização e caracterização da área experimental

Dois experimentos foram conduzidos no período de outubro/2016 a fevereiro/2017, em área comercial da Fazenda Tropical, no município de Montividiu – GO (Figura 1). O talhão tem sido manejado em sistema plantio direto de soja e milho há 15 anos. A área localiza-se entre a latitude 17° 24' S e a longitude de 51° 26' O e tem altitude variando entre 880 e 952 metros. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico de textura muito argilosa e argila arenosa. Anteriormente à implantação dos ensaios, amostras de solo foram coletadas para caracterização química e textural das áreas (Tabela 1). Os locais dos experimentos foram escolhidos em virtude do teor de argila de cada área. A área 1 apresenta textura muito argilosa, com 670 g kg⁻¹ de argila e 230 g kg⁻¹ de areia. A área 2 também apresenta textura argila arenosa, porém com 390 g kg⁻¹ de argila e 560 g kg⁻¹ de areia, um solo com menor capacidade de armazenamento de água.

Durante a condução dos ensaios, a temperatura média foi de 22,52 °C e a pluviosidade foi de 1.136 mm, bem distribuídos durante o período.

Implantação e condução dos experimentos

A semeadura da área foi realizada entre os dias 10 e 12 de outubro de 2016, com o solo em condição friável. Utilizou-se uma semeadora com sistema de distribuição de sementes pneumático e sulcador tipo disco. A cultivar utilizada foi Brasmax Power IPRO, que pertence ao grupo de maturação 7,3 com hábito de crescimento indeterminado e de médio potencial de ramificação. Na semeadura, utilizou-se 600.000 sementes ha⁻¹ e espaçamento de 0,5 m. A adubação foi realizada com 226 kg ha⁻¹ de 00–40–00 aplicados no sulco de semeadura e com 150 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio aplicados em superfície antes da semeadura da soja. Os tratos culturais foram realizados seguindo as recomendações técnicas da cultura da soja (EMBRAPA, 2014).

Os experimentos foram efetivamente implantados com as plantas em estágio V2 (Costa & Marchezan, 1982), quando se realizou o desbaste e ajuste das populações em função dos tratamentos.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por cinco densidade de plantas: 12, 15, 18, 21 e 24 plantas m^{-1} , ou 240, 300, 360, 420 e 480 mil plantas ha^{-1} . Para a microrregião de estudo (301 – Norte MS e Sudoeste GO), a empresa Brasmax recomenda população entre 300 e 400 mil plantas ha^{-1} . Cada parcela foi composta de cinco linhas de 4 metros de comprimento. A área útil foi constituída pelas três fileiras centrais, desprezando 1 m de cada extremidade.

Avaliações e análise estatística

As avaliações foram realizadas no período de maturação fisiológica das plantas, fase caracterizada como R8 (Costa & Marchezan, 1982). Para tal, 10 plantas da área útil de cada parcela foram selecionadas aleatoriamente para avaliação da altura de planta (AP), altura de inserção da primeira vagem (AV), número de ramos (NR), número de vagens (NV) e número de grãos (NG). Ademais, foram colhidas manualmente, também dentro da área útil, 4 m de plantas, que foram trilhadas para obtenção da produtividade (PD), determinada após pesagem e correção da umidade a 13% (MAPA, 2009), extrapolando o resultado para $kg\ ha^{-1}$. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade, e posterior análise de regressão, sendo o modelo ajustado em função da significância das equações.

Resultados e Discussão

Os dados da análise descritiva da produtividade (variável básica) e dos componentes da produtividade (variáveis explicativas) nas duas áreas de estudo estão apresentados na tabela 2. Os dados apresentaram baixa dispersão para quase todos os componentes, de acordo com os valores do coeficiente de variação encontrados ($CV < 20\%$). A variável número de ramos foi a única que apresentou alto valor de CV (57% e 39%) e em ambas as áreas (Pimental-Gomes & Garcia, 2002).

Os diferentes níveis populacionais não apresentaram resultados para as variáveis MG, AP e AV em nenhuma das áreas estudadas (Tabela 2). A massa de mil grãos e o número de grãos por vagem são variáveis que possuem os aspectos geneticamente definidos, havendo pouca modificação com manejos diferentes (Peixoto et al. 2000).

A alteração no espaçamento entre linha provoca alteração na altura de plantas de soja (Heffig 2002). Lima et al. (2012), trabalhando com linhas convencionais, cruzadas e densidades diferentes de semeadura observaram que a maior densidade de plantas

resultou em maior altura final de plantas. Elevadas densidades de semeadura provoca o sombreamento das plantas que induz o estiolamento das mesmas. Esse comportamento é por causa da auxina, um hormônio vegetal que é oxidado na presença de luz (Wareing & Phillips, 1981) e que provoca a redução de crescimento longitudinal das plantas. Neste trabalho, apesar de ser esperado diferença de altura entre os tratamentos, o mesmo não ocorreu, provavelmente pelas características de crescimento desta cultivar. Outros estudos relacionando a produtividade de soja com densidade populacional também não encontraram diferença de altura de plantas quando modificou a densidade de plantas (Watanabe et al., 2005).

Os tratamentos com menor densidade populacional em ambas as áreas de estudo apresentaram maior NR, NV e NG. O aumento na densidade de plantas provocou decréscimo linear à essas variáveis (Figura 3 b;c;d e Figura 4 a;b;c). Ludwig et al. (2010) também encontraram maior número de ramos na menor densidade de semeadura quando avaliaram a influência de diferentes populações de plantas sob genótipos convencionais e transgênicos.

O desenvolvimento e número de ramos por planta de soja está relacionado com a competição intraespecífica por recursos do meio como luz, água e nutrientes (Thomas et al., 1998). O NR é o principal fator de plasticidade da soja, capaz de compensar o rendimento de grãos de acordo com as variações no estande de plantas (Cox & Cherney 2011). Outros pesquisadores (Parvez et al. 1989), utilizando um mesmo espaçamento, observaram que a redução da população de plantas de soja em 40 para 20 e 10 plantas m^{-2} , causou o aumento do número e comprimento total de ramos.

A alteração na densidade de plantas na área muito argilosa não provocou diferença na produtividade. Em outros estudos também foi constatado que o aumento da população de plantas reduziu linearmente o rendimento de grãos do caule e dos ramos das plantas, porém essa diminuição não resultou na diminuição no rendimento por área (Ethredge et al. 1989). O menor rendimento por planta é compensado pelo maior número de plantas. Os tratamentos com baixa densidade de semeadura obtiveram produtividades equivalentes aos outros tratamentos. Esses tratamentos tiveram o aumento da intensidade de luz que proporcionou o aumento da taxa fotossintética (Wells, 1991; Board & Harville, 1994; Ventimiglia et al., 1999), que provavelmente foi responsável pelo aumento da produtividade por planta. O arranjo espacial das plantas também proporciona melhor desenvolvimento das gemas reprodutivas e do

armazenamento de fotoassimilados, que proporciona o aumento do número de vagens e melhor enchimento de grãos (Taiz & Zeiger, 2002; Egli, 1988).

É suposto que a elevada capacidade de armazenar água do solo muito argiloso, provavelmente foi capaz de fornecer água suficiente para todas as densidades populacionais, e não afetou a produtividade. Isso significa que em solos com essas condições e mesma cultivar, pode-se reduzir a quantidade de sementes recomendada que muito provavelmente não haja perdas no rendimento de grãos, reduzindo custos na aquisição de sementes.

Na área argilosa, a alteração na densidade de plantas provocou diferença na produtividade. O tratamento com 18 plantas m^{-1} apresentou a maior produtividade (Tabela 2). Segundo Mundstock & Thomas (2005), condições de baixas densidades populacionais resultam em elevada ramificação. Este fator pode comprometer o rendimento da cultura pelas perdas provocadas pela produção demasiada de legumes nesses ramos. Os legumes produzidos nos ramos de soja influenciam em até 70% do rendimento de grãos (Thomas 1992). Além disso, é provável que a menor quantidade de argila na área reduz o armazenamento de água, e essa condição afetou a produtividade dos tratamentos com alta densidade populacional, que por sua vez promove maior competição por recursos entre as plantas.

A regressão da NR, NV, NG em função do número de plantas m^{-1} em solo com 67% de argila é apresentado na figura 3. O resultado confirma a relação de quanto menor a densidade populacional, menor é a competição interespecífica e então maior é o NR, NV e NG. Os gráficos a, b, e c, apresentaram uma linha de crescimento decrescente linear em função do aumento da densidade populacional.

Na área com 39% de argila, as variáveis explicativas, NR, NV e NG apresentaram o mesmo desempenho que na área com 67% de argila, ou seja, quanto maior a densidade populacional, menor é a quantidade de ramos, vagens e grãos pelas características intrínsecas deste cultivar. Diferentemente da primeira área, a PD apresentou diferença significativa, de modo que a alteração na densidade populacional afeta a produtividade. De acordo com a equação ajustada, neste solo com menor quantidade de argila a população de plantas que resulta em maior produtividade é de 19,4 plantas m^{-1} .

Conclusão

Para Latossolos Vermelhos muito argilosos utilizando a cultivar de soja Power Brasmex Ipro, recomenda-se adotar população de 240.000 plantas ha⁻¹ que não irá ocorrer perdas de produtividade, promovendo a redução de custos com sementes. Para solos com texturas argilosas, recomenda-se utilizar população de 388.000 plantas ha⁻¹.

O trabalho poderá servir como balizamento para futuros estudos com semeadura em taxa variável, visto que uma mesma cultivar apresenta desempenhos diferentes em solos com diferentes teores de argila.

Agradecimentos

À Capes, pela concessão da bolsa ao primeiro autor. À Fazenda Tropical, que disponibilizou a área de estudo, custeou as análises e deu total suporte logístico.

Referências

- AMADO, T. J. C., & SANTI, A. L. (2011). Using precision farming to overcome yield-limiting factors in Southern Brazil Oxisols: a case study. In D. Clay, J. Shanahan & J. Francis Pierce (Eds.), **GIS Applications in Agriculture—Nutrient Management for Improved Energy Efficiency** 3rd ed., p. 31–60.
- BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G. A. Criterion for acceptance of narrow-row culture in soybean. **Agronomy Journal, Madison**, v.86, n.6, p.1103-1106, 1994.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.31, n.3, pp. 315-331, 1980.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A.B. Optimal interpolation and isarithm mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.32, n.4, pp. 643-659, 1981.
- BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**, 2000.
- Butzen, S., & Gunzenhauser, B. Putting variable-rate seeding to work on your farm. **Crop Insights**, 19, No 15. Pioneer Hi-Bred, Johnston, IA, 2010.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.58, n.5, pp.1501-1511, 1994.

CONAB (COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2016/17 - 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_17_7_20_55_boletim_graos_abr_2017.pdf>. Acesso em: 04 maio. 2017.

COSTA, J.A.; MARCHEZAN, E. Características dos estádios de desenvolvimento da soja. Campinas: **Fund. Cargill**, p. 30, 1982..

COX, W. J.; CHERNEY, J. H. 2011. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, n.1, p.123-128.

UHRY, D. Avaliação e critério para a utilização de semeadora com sistema de taxa variável de sementes na cultura da soja. **Tese de Doutorado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. 2008. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.3, p.704-710.

EGLI, D. B. Plant density and soybean yield. **Crop Science**, Madison, v.28, p.977-981, 1988.

EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja, Região central do Brasil 2014. **Embrapa soja**, 2014. Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/975595/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2014>>

ETHREDGE, W.J.; ASHLEY, D.A.; WOODRUFF, J. M. Row spacing and plant population effects on yield components of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.6, p.947- 951, 1989.

FULTON, J.P. et al. Evaluation of variable-rate seeding for cotton. Auburn: **Alabama Agricultural Experimental Station**, 2007.

GOERING, C. E., & HANS, S. (1993). A field information system for SSCM. In **International Off-highway and Powerplant Congress and Exposition**, 1993, Milwaukee. Warrendale: SAE, 11 p. (SAE Technical Paper Series n. 932422).

HEIFFIG, L. S.; CÂMARA, G. M. S.; MARQUES, L. A.; PEDROSO, D. B.; PIEDADE, S. M. S. 2006. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.2, p.285-295.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York: **Oxford University Press**, pp. 561, 1989.

LIMA, S. F.; ALVAREZ, R. C. F.; THEODORO, G. F.; BAVARESCO, M.; SILVA, K. S. 2012. Efeito da semeadura em linhas cruzadas sobre a produtividade de grãos e a severidade da ferrugem asiática da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, n.6, p.954-962.

LINZMEYER JUNIOR, R.; GUIMARÃES, V. F.; DOS SANTOS, D.; BENCKE, M. H. 2008. Influência de retardante vegetal e densidades de plantas sobre o crescimento, acamamento e produtividade da soja. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.30, n.3, p.373-379.

LOWENBERG-DEBOER, J. Economics of variable rate planting for corn. **International conference on precision agriculture**, 4., 1998, St. Paul. Proceedings... Minneapolis: P.C. Robert; R.H. Rust; W.E. Larson, 1998. p.1643 51.

LUDWIG, M. P.; DUTRA, L. M. C.; LUCCA FILHO, O. A.; ZABOT, L.; UHRY, D.; LISBOA, J. I.; JAUER, A. 2010. Características morfológicas de cultivares de soja convencionais e Roundup Ready™ em função da época e densidade de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.4, p.759-767.

MACHADO, O. D. C.; ALONÇO, A.S.; FRANCETTO, T. R. ; CARPES, D.P. Acurácia e tempos de resposta de máquinas para aplicação de defensivos agrícolas à taxa variável. **Ciência Rural**, v. 00, p. 00-00, 2015.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, n. 8, pp. 1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.37, pp. 617-639, 1986.

MILANI, L., SOUZA, E. G., URIBE-OPAZP, M. A., GABRIEL FILHO, A., JOHANN, J. A., & PEREIRA, J. O. (2006). Management zones delineate by crop yield data (Unidades de manejo a partir de dados de produtividade). **Acta Scientiarum Agronomy**, 28, 591–598. doi:10.4025/actasciagron.v28i4.937.

MOLIN, J. P.. Precision farming, study I; art-state in remote sensors (Agricultura de precisão, parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento remoto). **Engenharia Agrícola**, 22, 83-02, (1997).

MOLIN, J. P.; MASCARIN, Leonardo S.; VIEIRA JUNIOR, Pedro A.. Avaliação de intervenções em unidades de aplicação localizada de fertilizantes e de populações de milho. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal , v. 26, n. 2, p. 528-536, Aug. 2006 .

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. **Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: EVANGRAF, 2005.

PARVEZ, A.Q.; GARDNER, F. P.; BOOTE, K. J. Determinate and indeterminate type soybean cultivar response to patterns, density and planting date. **Crop Science**, Madison, v.29., n.1, p.150-157, 1989.

PEIXOTO, C. P.; CÂMARA, G. M. S.; MARTINS, M. C.; MARCHIORI, L. F. S.; GUERZONI, R. A.; MATTIAZZI, P. 2000. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.1, p.89-96.

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

PORTZ, G., MOLIN, J. P., & JASPER, J. (2012). Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, 13, 33–44. doi:[10.1007/s11119-011-9243-4](https://doi.org/10.1007/s11119-011-9243-4).

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. 2003. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.3, p.405-411.

Regras para análise de sementes / Ministério da Agricultura,. Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília : **Mapa/ACS**, 2009.

SCHUMANN, A.W. et al. Optimizing variable rate granular fertilizer spreader performance for single-tree prescription zones. In: **Asae annual international meeting**, 2006, Portland. Proceedings... Portland: ASABE, 2006. p.1-14.

SHEARER, S.A. et al. Considerations for development of variable-rate controller test standard. In: **Asae annual international meeting**, 2002, Chicago. Proceedings... Chicago: ASAE e CGIR, 2002. p.1-14

SILVA, C. B.; VALE, S. M. L.; PINTO, F. A. C.; MULLER, C. A. S.; MOURA, A. D. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: a case study. **Precision Agric** 8, 255–265 (2007). DOI [10.1007/s11119-007-9040-2](https://doi.org/10.1007/s11119-007-9040-2). <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-007-9040-2>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. Porto Alegre: **Artimed**, 2002.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F. Rendimento de grãos de soja afetado pelo espaçamento entre linhas e fertilidade do solo. **Ciência. Rural**, v. 28, n. 4, p. 543-546, 1998.

THOMAS, A.L. Desenvolvimento e rendimento da soja em resposta à cobertura morta e à incorporação de gesso ao solo, com e sem irrigação. 1992. 91f. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)** - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAZQUEZ, G. H.; CARVALHO, N. M.; BORBA, M. M. Z. 2008. Redução na população de plantas sobre a produtividade e qualidade fisiológica da semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.30, n.2, p.1-11.

VAZQUEZ, G. H.; CARVALHO, N. M.; BORBA, M. M. Z. 2008. Redução na população de plantas sobre a produtividade e qualidade fisiológica da semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.30, n.2, p.1-11.

VENTIMIGLIA, L. A.; COSTA, J. A.; THOMAS, A. L.; PIRES, J. L. F. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.34, n2, p.195-199, fev. 1999.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, pp.1-75, 1983.

VIEIRA JUNIOR, P.A.; MOLIN, J.P.; DOURADO NETO, D.; MANFRON, P.; MASCARIN, L.S.; FAULIN, G.C.; DETOMINI, E.R. Relação entre população, distribuição espacial de plantas, atributos do solo e rendimento de grãos de milho. **Congresso brasileiro de agricultura de precisão**, 1., 2004, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2004. 1 CD-ROM.

WAREING, F. P.; PHILLIPS, I. D. J. Growth and differentiation in plants. Oxford: **Pergamen**, 1981. 343 p.

WATANABE, R. T.; FIORETTO, R. A.; FONSECA, J. B.; SEIFERT, A. L.; SANTIAGO, D. C.; CRESTE, J. E.; HARADA, A.; CUCOLOTO, M. Produtividade da soja em função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 4, p. 477-484, 2005.

WELLS, R. Soybean growth response to plant density: Relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. **Crop Science**, Madison, v.31, n.3, p.755-761, 1991.

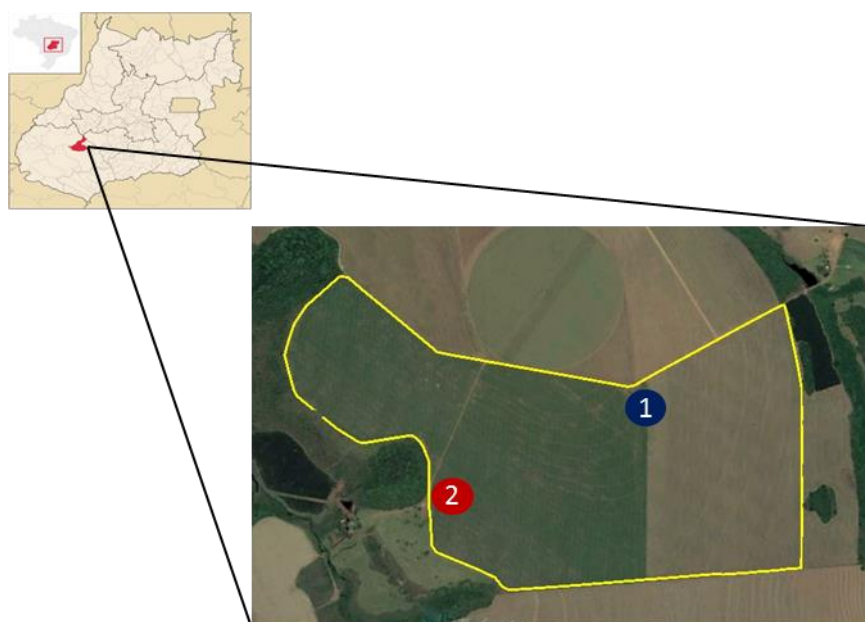


Figura 1. Mapa de localização dos experimentos

Tabela 1. Características químicas e texturais do solo (camada 00-20 cm) em que os experimentos foram conduzidos.

Área	P	M.O	pH	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	Argila	Silte	Areia
	---- mg dm ³ ----		(CaCl ₂)							----- % -----		
1	14,8	31,4	4,87	0,18	1,57	0,18	6,0	8,0	25	67	10	23
2	16,5	24,8	5,13	0,11	1,68	0,25	4,1	6,2	33	39	5	56

Tabela 2. Resumo da análise de variância e médias observadas das variáveis analisadas nas áreas 1 e 2.

Área	Variáveis	Fcalc	CV	12 (pl m ⁻¹)	15 (pl m ⁻¹)	18 (pl m ⁻¹)	21 (pl m ⁻¹)	24 (pl m ⁻¹)
----- médias observadas -----								
1	PD	0,5901 ^{ns}	6,58%	4.672	4.533	4.536	4.687	4.849
	MG	0,4137 ^{ns}	6,48%	177	188	177	178	172
	AP	0,5741 ^{ns}	2,51%	93	95	95	95	94
	AV	0,1492 ^{ns}	7,43%	13	14	14	14	15
	NR	0,0019**	57,38%	2	1	1	0	0
	NV	0,0175**	17,84%	47	41	37	32	30
	NG	0,0289*	17,25%	117	101	95	80	77
2	PD	0,0131**	5,68%	4.785	4.805	5.385	5.295	4.890
	MG	0,2871 ^{ns}	4,63%	187	189	190	200	195
	AP	0,6705 ^{ns}	4,63%	96	97	96	94	96
	AV	0,2479 ^{ns}	9,15%	13	12	14	14	14
	NR	0,0000**	39,62%	2	1	1	0	0
	NV	0,0000**	8,51%	49	42	36	29	29
	NG	0,0000*	7,98%	122	106	91	76	74

PD: produtividade (kg ha⁻¹); MG: massa de mil grãos (g); AP: altura de planta (cm); AV: altura de inserção da primeira vagem (cm); NR: número de ramificações; NV: número de vagens; NG: número de grãos, *Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t-student; **Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste t-student; ^{NS} Não significativo,

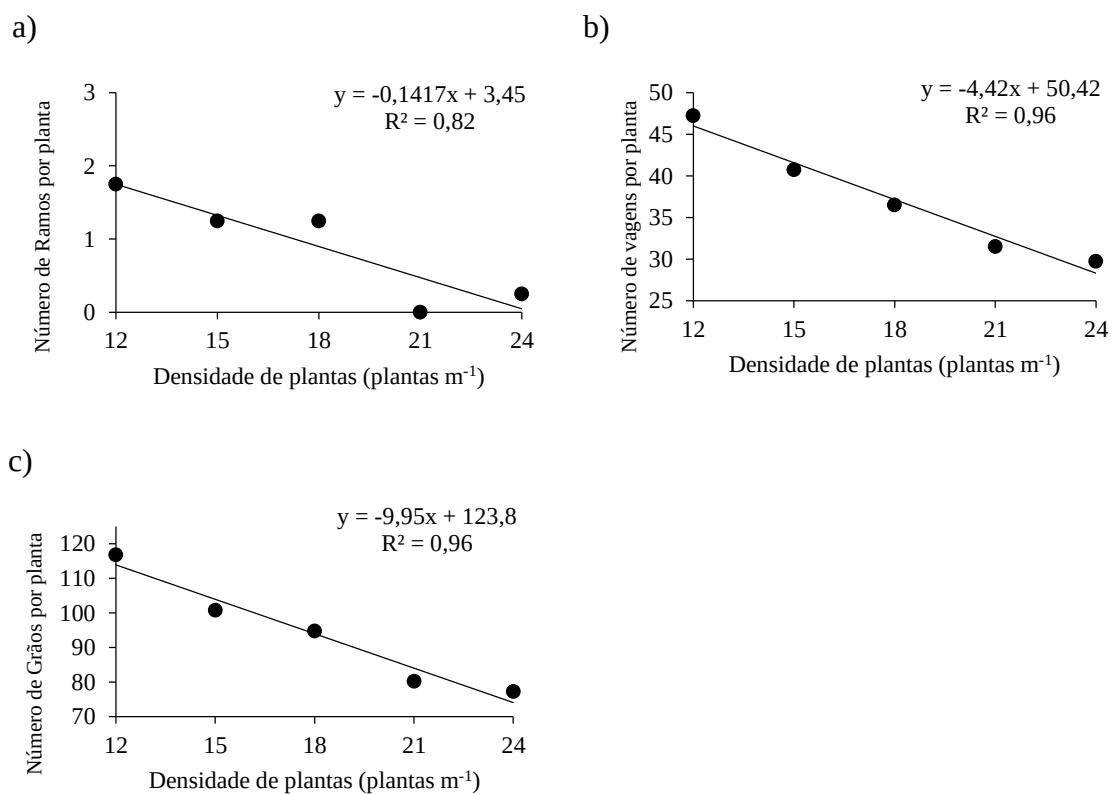


Figura 3. Número de ramos, Número de vagens e Número de grãos por planta em função da variação da densidade de plantas quando cultivada em solo com 67% de argila.

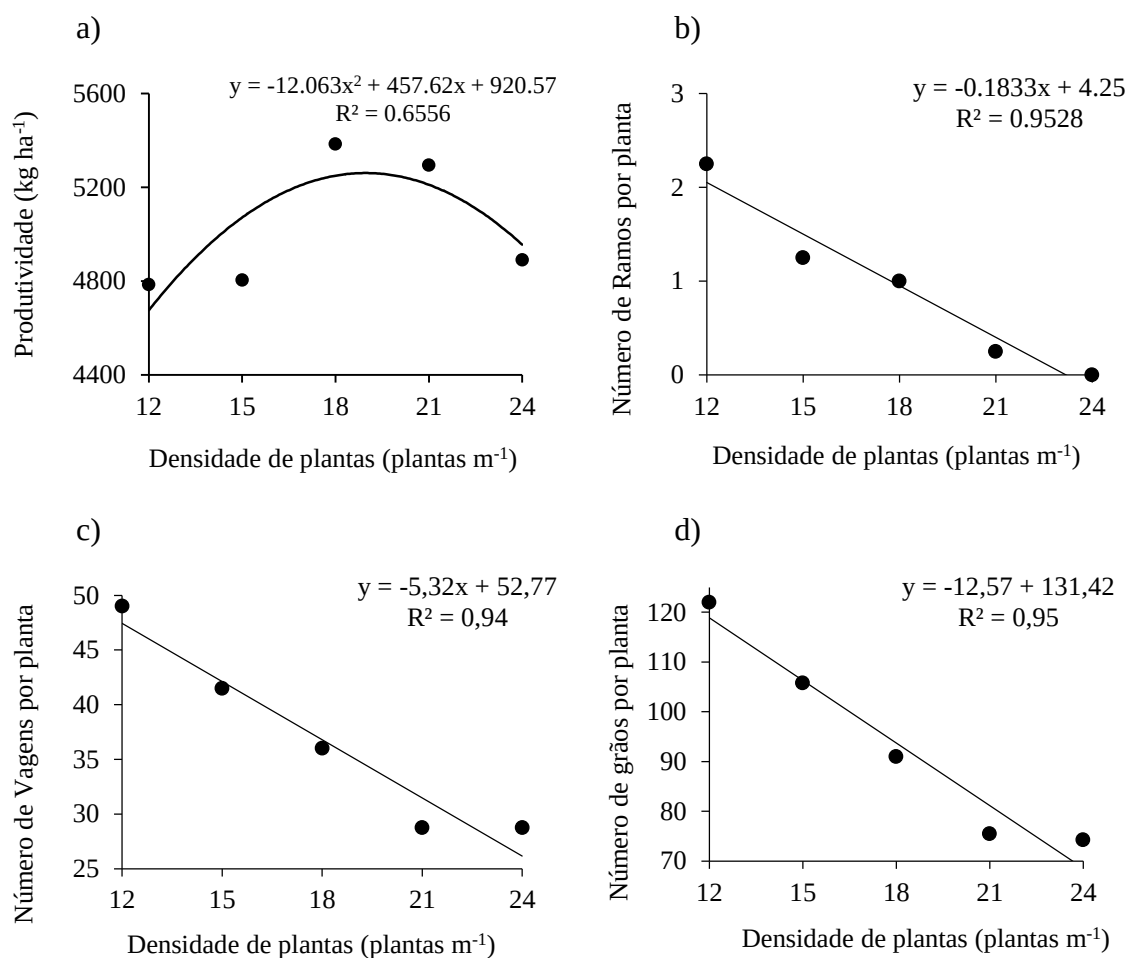


Figura 4. Número de ramos, Número de vagens e Número de grãos por planta em função da variação da densidade de plantas quando cultivada em solo com 39% de argila.