

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SUZANY SANTOS DE MOURA

**ZONAS DE APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
APARENTE DO SOLO PARA A VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA NA
CULTURA DA SOJA**

CHAPADÃO DO SUL – MS
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SUZANY SANTOS DE MOURA

**ZONAS DE APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
APARENTE DO SOLO PARA A VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA NA
CULTURA DA SOJA**

Orientador: Prof. Dr. Fabio Henrique Rojo Baio

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS
2018



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Campus de Chapadão do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Suzany Santos de Moura

ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Fábio Henrique Rojo Baio

**ZONAS DE APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
APARENTE DO SOLO PARA A VARIAÇÃO NA TAXA DE SEMEADURA NA
CULTURA DA SOJA**

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Fábio Henrique Rojo Baio

Prof.(a) Dr.(a) Paulo Eduardo Teodoro

Prof.(a) Dr.(a) Marcelo Valentini Arf

Chapadão do Sul, 20 de Março de 2018.

DEDICATÓRIA

A Deus por estar sempre ao meu lado me sustentado em momentos de dificuldades.

Aos meus pais Sra. Cidelina e Sr. Sebastião, que me ensinaram a ter persistência no meu caminho até o objetivo, pelo apoio nos momentos de incertezas.

Ao meu companheiro Eduardo pelo apoio e amor a mim dedicado.

A toda a minha família, sem vocês nenhuma conquista valeria a pena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela força e coragem durante toda a caminhada.

A minha família pelo amor, carinho, apoio, incentivo, e empenho dedicado a mim, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Dando-me coragem para descobrir realidades e novas possibilidades. Sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

Ao meu companheiro Eduardo Gomes dos Santos pelo amor, carinho e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Henrique Rojo Baio pela sapiência compartilhada, orientações, disponibilidade e contínuo apoio. Sem ele esse trabalho não seria possível.

Aos meus amigos da Fundação Chapadão pela grande ajuda com o fornecimento de material para a realização deste trabalho. Sem eles a elaboração do mesmo teria sido árdua e difícil.

Aos meus colegas da UFMS que me ajudaram na realização dessa pesquisa.

Aos professores pelos ensinamentos, e colaboradores da Pós-graduação que sempre estavam pronto a me auxiliar.

As pessoas com quem convivi ao longo desses dois anos, por acrescentarem muitas experiências em minha vida. Quero expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade.

EPIGRAFE

“O SEGREDO DO SUCESSO É A CONSTÂNCIA DO PROPÓSITO”.

Benjamin Disraeli

RESUMO

MOURA, Suzany Santos de. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Zonas de aplicação em função da condutividade elétrica aparente do solo para a variação na taxa de semeadura na cultura da soja.

Autor: Suzany Santos de Moura

Professor Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio

A produtividade da soja pode ser afetada por diversos fatores existentes no ambiente como a população de plantas. A demanda crescente por alimento requer maior eficiência na gestão da lavoura e para isso, é preciso adotar tecnologias com maior precisão para manejos adequados, tornando necessária a implantação das tecnologias da agricultura de precisão (AP). Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a semeadura da soja em taxa variada (VRT), em zonas de aplicação determinadas pelo mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e suas relações com a fenologia da planta e produtividade de grãos. O experimento foi conduzido a campo, na safra de 2016/2017 em Chapadão do Sul – MS. A área foi delimitada em zonas de aplicações em função da CEa do solo. Esta foi diagnosticada através da sonda do Veris P4000. Simultaneamente a coleta de CEa, foram coletados dados de compactação do solo quando este se encontrava na capacidade de campo. Os valores de CEa e RP foram amostrados em 78 pontos georeferenciados, nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Após, foram elaborados os mapas por interpolação krigagem ordinária usando o ArcGis 10.4. Com o mapa da CEa na profundidade 0,0 a 0,2 m foram estabelecidas as três zonas de aplicações, onde foram instaladas três populações de plantas em VRT que variou em torno de 20% da população média (311, 360 e 422 mil plantas por hectare), e em taxa fixa (360 mil plantas ha⁻¹). A região com menor CEa, recebeu a maior população de sementes, 422 mil sementes por hectare. A região de maior condutividade elétrica aparente do solo representou maior potencial de vigor de plantas e recebeu a menor população de sementes, 311 mil sementes de soja por hectare. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizados, com seis repetições em cada tratamento (VRT *versus* população fixa de sementes). A semeadura da soja, com a cultivar Desafio RR 8473 RSF, foi realizada no dia 16 de novembro de 2016, em uma área de 1 ha com histórico de 15 anos de sistema plantio direto. Nas diferentes zonas de aplicação foram definidos 33 pontos para as avaliações fenológicas e de produtividade. Para a análise fenológica, foi medido a altura da planta (ALT) e índice de vegetação (IV). A colheita foi realizada manualmente em cada ponto amostral em uma área de 4,05 m². Foi realizada a pesagem por parcela e corrigido a umidade a 14%. Após, calculou-se o peso médio da massa de 100 grãos. Foram realizadas análises geoestatística por meio do software Rbio, para estudar a variabilidade espacial. Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo estimado o contraste entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional, correlações de Pearson e análise de componentes principais. Todas as variáveis apresentaram dependência espacial. Houve diferença no contraste entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional indicando diferença no manejo das diferentes populações de sementes. As zonas de aplicações foram bem definidas com base na CEa na profundidade 0,0-0,2 m. A variação na população de sementes proporcionou igualdade na produtividade e não interferiu na massa de grãos produzidos pela cultura da soja.

Palavras chave: Zonas de aplicação. População de Sementes. Tecnologia de Taxa Variável (VRT).

ABSTRACT

MOURA, Suzany Santos de. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Application Zones in function of the apparent electrical conductivity of the soil for the variation in the sowing rate in the soybean crop.

Author: Suzany Santos de Moura

Adviser: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio

Soya productivity can be affected by several factors in the environment such as the plant population. The increasing demand for food requires greater efficiency in crop management and for this, it is necessary to adopt technologies with greater precision for adequate management, making necessary the implantation of precision agriculture (AP) technologies. Thus, the objective of this work was to study the sowing of soybean in varied taxa (VRT), in application zones determined by the mapping of apparent electrical conductivity of the soil (CEa) and its relations with plant phenology and grain yield. The experiment was conducted in the field, in the 2016/2017 harvest in Chapadão do Sul - MS. The area was delimited in zones of applications due to the CEa of the soil. This was diagnosed by the Veris P4000 probe. Simultaneously with the CEa collection, soil compaction data were collected when the soil was in the field capacity. The CEa and RP values were sampled at 78 georeferenced points, at depths of 0-0,2, 0,2-0,4 and 0,4-0,6 m. Afterwards, maps were drawn by ordinary kriging interpolation using ArcGis 10.4. With the CEa map at 0,0 to 0,2 m depth, the three application zones were established, where three populations of VRT plants were established, varying by around 20% of the average population (311, 360 and 422 thousand per hectare), and at fixed rates (360,000 ha⁻¹ plants). The region with the lowest CEa, received the largest seed population, 422 thousand seeds per hectare. The region with the highest apparent electrical conductivity of the soil represented a greater potential of plant vigor and received the lowest seed population, 311 thousand soybean seeds per hectare. The design was completely randomized, with six replicates in each treatment (VRT versus fixed seed population). The sowing of soybean, with the cultivar Desafio RR 8473 RSF, was carried out on November 16, 2016, in an area of 1 ha with a history of 15 years of no-tillage system. In the different application areas, 33 points were defined for phenological and productivity evaluations. For the phenological analysis, plant height (ALT) and vegetation index (IV) were measured. Harvest was done manually at each sampling point in an area of 4,05 m². Weighed per plot and corrected for moisture at 14%. After that, the average weight of the mass of 100 grains was calculated. Geostatistical analyzes were performed using Rbio software to study spatial variability. The data were submitted to analysis of variance, estimating the contrast between precision agriculture versus conventional agriculture, Pearson correlations and principal components analysis. All variables presented spatial dependence. There was a difference in the contrast between precision agriculture versus conventional agriculture indicating differences in the management of different seed populations. The application zones were well defined based on CEa at depth 0,0-0,2 m. The variation in the seed population provided equality in productivity and did not interfere in the grain mass produced by the soybean crop.

KEY WORDS: Application Zones, Seed Population, Variable Rate Technology (VRT).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Importância da cultura da soja.....	2
2.2 Agricultura de precisão (AP).....	3
2.3 Sensoriamento remoto (SR)	4
2.4 Sensores terrestre em tempo real	5
2.5 Sensor para o mapeamento de condutividade elétrica aparente do solo.....	5
2.6 Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)	6
2.7 Resistência mecânica do solo à penetração (RP).....	6
2.8 Zona de aplicação	7
2.9 Semeadura em taxa variada (VRT)	8
2.10 Índice de vegetação - NDVI	10
3. REFERÊNCIAS	11
CAPÍTULO 1 - Zonas de aplicação em função da condutividade elétrica aparente do solo para a variação na taxa de semeadura na cultura da soja	18
RESUMO	18
ABSTRACT	19
INTRODUÇÃO.....	20
MATERIAL E MÉTODOS.....	21
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
Análise geoestatística	27
Contrastes entre agricultura de precisão <i>versus</i> agricultura convencional	28
Correlação entre as variáveis analisadas e a produtividade.....	36
Análise de componentes principais (ACP).....	39
CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população e a demanda crescente por alimento requer maior eficiência na gestão da lavoura, produtividade e proteção ao meio ambiente. Para tanto, é preciso adotar técnicas e tecnologias com maior precisão para manejos adequados, sempre utilizando a terras em conformidade com sua aptidão agrícola.

O monitoramento e avaliações dos recursos e atributos do solo são importantes na identificação da variabilidade espacial da lavoura em todos seus aspectos. A implantação da agricultura de precisão (AP) pode resolver os problemas da desuniformidade das lavouras, com manejos específicos e adequados para cada região do campo agrícola.

Atualmente no Brasil, o gerenciamento eficiente no agronegócio utiliza as ferramentas da agricultura de precisão, como a adoção de tecnologias de mapeamento das características do solo, definição de zonas homogêneas e aplicações diferenciadas dos fatores de produção, VRT (*Variable Rate Technology*). As taxas de semeadura em VRT podem ser definidas em função das zonas de manejo, baseadas em mapas da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) de cada região distintas, sendo a semeadura em taxa variada uma opção de aumento de produtividade.

Nas diferentes abordagens da agricultura de precisão, o levantamento de dados e a mensuração da condutividade elétrica aparente do solo medida por sensores fornece suporte para uma boa interpretação da variabilidade. Isso permite que as aplicações sejam efetuadas de acordo com as informações fornecidas por esses sensores, que permitem realizar inferências sobre as condições do solo fornecendo informação para as aplicações em conformidade.

Combinações de fatores existentes no ambiente afetam o crescimento das plantas e, por conseguinte a produtividade das culturas, compreendendo que campos com maior uniformidade tendem a produzir mais do que aqueles que são mais heterogênicos. Visto isso, este trabalho teve como objetivo estudar a semeadura da soja em VRT, em zonas de aplicação determinadas pelo mapeamento da CEa do solo e suas relações com a fenologia da planta e produtividade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da cultura da soja

A cultura da soja (*Glycine max.* L. Merrill) representa um dos elementos mais fortes da economia brasileira, transcendendo o meio rural, principalmente por ser produto de exportação, industrialização e com boas possibilidades de participação na dieta alimentar (YORINORI, 2007). Atualmente, o Brasil é uma potência agrícola, destacando-se na produção de grãos, carnes e biocombustíveis, e está entre os maiores produtores da oleaginosa (EMBRAPA, 2011) com 35.022,8 mil hectares de área cultivada na safra 2017/18 (CONAB, 2018).

É a commodity de maior importância no cenário agrícola brasileiro, devido ao grande volume produzido (aproximadamente 111 milhões de toneladas) e exportado (aproximadamente 66 milhões de toneladas) (CONAB, 2018), tendo contribuição significativa para o superávit da balança comercial. O Brasil destaca-se, como o segundo maior produtor mundial da soja, ficando atrás somente dos EUA (USDA-FAS, 2017).

A qualidade das sementes produzidas no país teve significativa melhora, pois a classificação por tamanho, adoção do tratamento das sementes com fungicidas, aumento da altura de planta, antecipação da semeadura, redução da população de plantas especialmente em cultivares com maior porte e melhoria na capacidade produtiva do solo, contribuem para a obtenção de populações mais uniforme (EMBRAPA, 2011).

A resposta da soja na produtividade de grãos à variação na população de plantas depende de fatores como o clima, época de semeadura, cultivar e fertilidade do solo. São eles que condicionam o crescimento das plantas, o fechamento das entrelinhas e o acamamento das plantas (EMBRAPA, 2011).

A população de plantas pode variar de acordo com as características do solo, onde as condições são mais favoráveis para o crescimento das culturas pode-se aumentar a quantidade de sementes ou plantas por unidade de área (COELHO e SILVA 2009). Entretanto, variações na população não interferem na qualidade fisiológica, no tamanho e na massa de 100 grãos, pois a cultura da soja é capaz de suportar grandes reduções de população sem perdas significativas de produtividade (VAZQUEZ et al., 2008).

2.2 Agricultura de precisão (AP)

A agricultura de precisão tem como premissa o manejo da lavoura em todos seus aspectos, respeitando a variabilidade espacial dos principais fatores que determinam o desempenho das culturas. Embora, ainda hoje, produtores tendem a cultivar o campo como uma única unidade, a AP apresenta várias formas de abordagem, mas sempre com o mesmo objetivo: utilizar estratégias para resolver os problemas da desuniformidade das áreas agrícolas e se possível tirar proveito dessas disparidades (MAPA, 2013).

Essa técnica apresenta perspectivas promissoras no desenvolvimento de novas tecnologias para a gestão de culturas, além de possíveis benefícios ambientais, permite a reduções de custos de produção, otimiza a utilização de insumos e aumenta a produtividade (MOLIN e CASTRO, 2008).

O sistema de agricultura de precisão implica a análise da variabilidade espacial, sendo caracterizada pelas etapas de coleta de dados, gerenciamento da informação, aplicação de insumos a taxa variada e, por fim, na avaliação econômica e ambiental dos resultados (SOARES FILHO e CUNHA, 2015). Esses dados são transformados em mapas, importantes na quantificação da variabilidade existente, identificando sua localização na área (MOLIN, 2002).

Com base nesses dados, são averiguadas as relações de causa e efeito entre a produção e os fatores, e posteriormente determinado estratégias de gerenciamento para aplicações localizada dos insumos e das práticas, visando à correção das irregularidades verificadas (COELHO, 2005; BARBIERI et al., 2008).

A evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global e muitas outras tecnologias estão proporcionando à agricultura uma nova forma de se enxergar a propriedade agrícola, deixando de ser apenas uma, e sim várias propriedades dentro da mesma, porém com características específicas (TSCHIEDEL e FERREIRA, 2002).

Dentre as tecnologias abordadas pela AP estão à amostragem de solo em grade, adubação em taxa variada a lanço, uso de sensores agrônômicos, e irrigação de precisão, medição da condutividade elétrica aparente do solo e uso de fotografias aéreas. Porém, apenas a amostragem de solo em grade e a adubação em taxa variada a lanço são as tecnologias de AP mais empregadas, e tecnologias de ponta como a medição da condutividade elétrica aparente do solo e uso de fotografias aéreas ainda estão muito incipientes (SOARES FILHO e CUNHA, 2015).

Os resultados das pesquisas evidenciam que as tecnologias da AP ainda têm muito a crescer, mas que evidentemente a resolução de problemas como a falta de mão de obra especializada, altos custos de implantação, falta de compatibilidade entre os aplicativos computacionais, as máquinas e equipamentos são de grande importância (SOARES FILHO e CUNHA, 2015).

2.3 Sensoriamento remoto (SR)

Sensoriamento remoto (SR) é uma técnica de coleta de informações à distância, por meio de fotografia e radar aéreo, ou imagem de satélites, sendo amplamente utilizado em aplicações relacionadas à caracterização da vegetação. Os dados auxiliam no gerenciamento agrícola considerando a variabilidade espacial dos fatores que interferem na produtividade das culturas (VICTORIA et al., 2012; VICENTE et al., 2012).

A ciência do sensoriamento remoto envolve a obtenção de informações sobre determinado alvo, por meio da análise de dados coletados por sensores em plataformas terrestres, aéreas (avião) ou instaladas em satélites para a geração de diagnósticos e recomendações (NOVO, 2010).

As técnicas de SR são importantes em diagnósticos no campo, como a estimativa da produtividade através da biomassa da cultura, avaliação nutricional, detecção de pragas e doenças, previsão do tempo, avaliação da necessidade hídrica e do vigor das plantas obtidas em sítio específico e avaliação do estágio fenológico (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Uma das mais importantes áreas do SR é a radiometria espectral, realizada por meio de mensurações a campo em tempo real, obtendo imagens multiespectrais. Os dados obtidos remotamente pela detecção de diferenças na refletância, relacionadas à densidade da cobertura vegetal, identifica a intensidade com que cada material, seja um tipo de solo, de rocha ou de vegetação, reflete a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO et al., 2008).

A principal fonte da energia utilizada no sensoriamento remoto é gerada pelo sol, que é expressa em termos de comprimento de ondas, espectro eletromagnético, dividido em regiões ou faixas e suas respectivas características (NOVO, 2010). Todavia, o SR tem seus desafios, pois a iluminação natural nem sempre está disponível, além da presença de nuvens, o que pode variar a intensidade e características espectrais dos alvos (MAPA, 2013).

2.4 Sensores terrestre em tempo real

Novas tecnologias de sensoriamento direto ou remoto estão constantemente sendo geradas, aperfeiçoadas e difundidas. Sensores que monitoram propriedades físico-químicas do solo, como o caso dos diferentes modelos de sensores de condutividade elétrica aparente, utilizados por contato, obtêm informações da variabilidade espacial dos fatores do solo e de produção (FAULIN, 2005).

Os sensores mensuram diversas propriedades do solo, usados tanto para controlar o equipamento de aplicação de taxa variável em tempo real, ou em conjunto com um Sistema de Posicionamento Global (GPS) para gerar mapas de campo de uma determinada propriedade do solo. Dependendo do espaçamento, velocidade de deslocamento, da amostragem e de medição, o número de pontos mensurados por área pode variar, além do custo do mapeamento (ADAMCHUK et al, 2004).

Esses sensores eletromagnéticos fornecem informações sobre as diferenças e semelhanças de solo tonando possível dividir o campo em áreas menores e relativamente consistentes, referidos como zonas de aplicações. Com os sensores em movimento (*on-the-go*), são desenvolvidos diferentes tratamentos de solo em taxa variável, baseados em mapas em tempo real reduzindo o efeito da variabilidade do solo dentro de cada zona de gestão (ADAMCHUK et al., 2004).

2.5 Sensor para o mapeamento de condutividade elétrica aparente do solo

O método de administração específica do local é baseado na utilização de mapas. Existe também outro método que fornece a capacidade de variar a taxa de aplicação em culturas sem nenhum mapeamento envolvido, baseando-se em mensurações das propriedades desejadas, geralmente propriedades do solo ou características da cultura. Medições feitas por esse sistema são processadas e utilizadas imediatamente, não exigindo necessariamente a utilização de um GPS. Nem requer análise de dados extensiva antes de fazer aplicações em taxa variada (ESS et al., 2001).

Um dos instrumentos disponível comercialmente para o mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo é do fabricante Veris (Salina, KS, EUA), que mensura a CEa usando um conjunto de eletrodos que captam sinais elétrico através do solo, indicando condutividade elétrica aparente em profundidade. Esse conjunto de eletrodos utilizam circuitos elétricos para medir a capacidade de partículas do solo para conduzir ou acumular eletricidade. Quando são utilizados, o solo torna-se parte de um circuito eletromagnético, e

mudanças das condições locais afetam imediatamente o sinal gravado por um registrador de dados (ADAMCHUK et al., 2004).

Os sensores VIS-NIR e de CEa fornecem informações do perfil do solo, recolhendo medições ópticas através da janela de safira, no lado da sonda que se move para o perfil do solo. Na parte inferior da sonda tem um cone que em contato com o solo recolhe os dados da condutividade elétrica aparente do solo (VERIS TECHNOLOGIES, 2018).

2.6 Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)

A condutividade elétrica aparente do solo é a capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica. É muito utilizado na agricultura devido ao fato do solo conter variabilidade na composição físico-química, apresentando diferentes níveis de condutividade elétrica aparente (MOLIN e RABELLO, 2011).

Esse parâmetro tem sido utilizado como um indicador de características do solo, como salinidade, textura e estratificação, umidade, densidade, matéria orgânica, CTC, lixiviação, partição de doses de herbicidas, definição de bordas em classificação de solos, classes de drenagem e recarga de lençol freático (CORWIN e LESCH, 2005).

O teor de água, a temperatura, as propriedades físicas (textura, estrutura), químicas (matéria orgânica do solo, íons na solução do solo e salinidade) influenciam na condutividade elétrica aparente do solo (BOTTEGA et al., 2015). Em solução salina, o maior contribuinte para CEa é a concentração de soluto, mas para solos mais temperadas ou não salinos com baixas concentrações de eletrólitos dissolvidos, as principais influências são umidade e teor de argila (KING et al., 2005). Quanto maior a quantidade de sais presente na solução, maior será o valor de condutividade elétrica aparente obtida (BRANDÃO e LIMA, 2002).

Considerando a classificação da variância da CEa de uma determinada área, existe a possibilidade de gerar um mapeamento eficiente na investigação do comportamento e da variabilidade espacial de propriedades do solo, permitindo assim, identificar áreas com propriedades semelhantes e delimitar unidades de gerenciamento (FRAISSE et al., 2001; MOLIN e CASTRO, 2008).

2.7 Resistência mecânica do solo à penetração (RP)

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é uma propriedade física do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base na avaliação do efeito do sistema de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TAVARES FILHO e RIBON, 2008). A densidade

do solo, a porosidade total e de aeração e a RP podem caracterizar o estado de compactação do solo (SUZUKI et al., 2007), podendo este último ser expresso através da medição da RP, pois sua quantificação representa um importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SILVEIRA et al., 2010).

A determinação da RP é realizada mediante a resistência mecânica que o solo oferece à penetração de um instrumento de sondagem (penetrômetro), chamado de “índice de cone” (BENGOUGH et al., 2001). O índice reflete o comportamento do solo quanto à compactação, ao conteúdo de água (SAFFIH-HDADI et al., 2009), à granulometria e tipo de argila. É dependente da textura, porosidade, estrutura, estabilidade de agregados e teor de água (TAVARES FILHO e RIBON, 2008).

A compactação do solo é desfavorável para a planta, pois altera negativamente várias propriedades do solo e com isso a capacidade de penetração das raízes, a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, restringindo a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea e, conseqüentemente, a produtividade da cultura (DRESCHER et al., 2012).

Para a solução desse problema, é necessário medidas mitigatórias (DRESCHER et al., 2012). Uma das práticas frequentes tem sido a escarificação do solo, que ao romper a camada superficial encrostada e a camada subsuperficial compactada, eleva o volume do solo, proporcionando aumento da porosidade e redução da densidade do solo (KOCHHANN e DENARDIN, 2000). Também tem sido empregada a aração como prática mitigadora da compactação do solo (GARRIDO et al., 2011).

2.8 Zonas de aplicações

As tecnologias da agricultura de precisão são usadas na obtenção de informações sobre características do solo, de produtividade em diferentes pontos de um campo agrícola para o estabelecimento eficiente de estratégias de gerenciamento da lavoura (VELANDIA et al., 2008).

Entre as abordagens da AP estão às zonas de gerenciamento, que são regiões que apresentam topografia e atributos do solo com o mínimo de heterogeneidade (LUCHIARI JUNIOR et al., 2000). A determinação de áreas homogêneas dentro da lavoura não é fácil de conseguir, devido à combinação complexa entre os fatores que podem influenciar a produtividade (MOLIN e CASTRO, 2008).

Dentro do campo de produção, existem regiões que apresentam características diferentes (relevo, exposição solar, profundidade de horizontes, textura, capacidade de

armazenagem de água) tendo assim diferente potencial produtivo, impossibilitando um desempenho vegetal homogêneo na área (VELANDIA et al., 2008).

O conhecimento da variabilidade espacial em uma área agrícola é o princípio para o manejo localizado, propiciando a sustentabilidade do meio, sendo as zonas de manejo áreas do terreno de igual produção potencial, eficientes no uso de insumos. Essas zonas homogêneas podem ser delineadas utilizando imagens do solo e de plantas, mapas de colheita, de classificação de solos e de condutividade elétrica aparente do solo (LUCHIARI JUNIOR et al., 2000).

As zonas de gerenciamento são definidas como a divisão de uma determinada área em subáreas, ou áreas homogêneas para qual poderá ser aplicado doses uniforme de insumos (PRADO et al., 2015), e uma vez delimitadas podem ser tratadas com uniformidade, e as intervenções de manejo devem ser prescritas especificamente para cada zona considerando os fatores limitantes de produtividade existentes em cada uma delas (VELANDIA et al., 2008).

É necessário definir o número de amostras para delimitar, com confiabilidade, as zonas homogêneas para auxiliar a tomada de decisão quanto ao manejo de solo (NASCIMENTO et al., 2014). O uso de equipamentos portáteis e a redução da densidade amostral podem permitir a determinação rápida, com maior praticidade e menor custo (MORETTI et al., 2007).

Com o aperfeiçoamento das tecnologias agrícola, geoespaciais e das informações para fins de aplicações no agronegócio, há diversas ferramentas para auxiliar na delimitação das zonas homogêneas de manejo, como os mapas de colheita, de classificação e condutividade elétrica aparente do solo (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011), e ainda conta com o auxílio de sensores de contato direto e de indução magnética (ADAMCHUK et al., 2004).

Essas estratégias são válidas para aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais e reduzir o impacto da agricultura no ambiente, considerando aspectos físicos do solo que limitam a produtividade potencial do mesmo, como a densidade e compactação, os quais são fatores limitantes ao crescimento radicular, a disponibilidade de água e consequentemente a absorção e uso eficiente de nutrientes pela planta (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011).

2.9 Semeadura em taxa variada (VRT)

As VRT (Tecnologia de Taxa Variada) são conjuntos de tecnologias utilizadas para efetuar aplicações diferenciadas dos fatores de produção, tendo em conta a informação

recolhida para cada unidade de área específica, em um determinado instante e parcela do terreno (COELHO e SILVA, 2009).

As doses de insumos na maioria dos casos são aplicadas uniformemente, mesmo nas plantas em menor desenvolvimento dentro do talhão. Enquanto que, em VRT é estabelecido uma dose para cada zona de gerenciamento dentro do mesmo talhão, levando em conta a fenologia da planta, diminuindo significativamente a dose e o volume aplicado, acarretando em um menor custo de produção (BAIO et al., 2015). O mesmo sistema de VRT pode ser implantado na distribuição das sementes, realizando semeadura em taxa variável.

A semeadura em taxa variável pode ser dirigida por mapas de recomendação, sendo uma abordagem correta e uma boa alternativa, pois os mapas são desenvolvidos a partir de mensurações de características de solo inferindo sobre aspectos específicos para posterior intervenção (MAPA, 2013).

Nos métodos baseados em mapas, as taxas de aplicações variam de acordo com a variabilidade espacial das parcelas. Essas informações podem ser fornecidas por um SIG (Sistema de Informações Geográficas), sendo o GPS fundamental neste caso, para a identificação e posição de cada instante de mensuração das características da parcela, para o reconhecimento da variabilidade, e a partir disso ajustar as taxas de aplicação. Esse método permite utilizar tecnologias que recolhe e analisa os dados mais complexos, facilitando o controle das máquinas no momento da aplicação (COELHO e SILVA, 2009).

Nos métodos baseados em sensores, as aplicações são efetuadas de acordo com informação fornecidas em tempo real sendo possível ajustar as taxas de aplicação no momento do recolhimento dos dados. Estes sensores podem avaliar as condições do solo ou das culturas, fornecendo informação para que se realizem as aplicações em conformidade. No caso das plantadoras, as densidades de sementeira e plantação poderão variar de acordo com as características do solo, onde as condições são mais favoráveis para o crescimento das culturas, pode-se aumentar a quantidade de sementes ou plantas por unidade de área. Também podem ocorrer condições particulares, como uma mancha de solo que afetem a germinação das sementes, sendo assim, a densidade de sementeira deverá ser aumentada (COELHO e SILVA, 2009; LUCHIARI JUNIOR et al., 2011).

Desta forma, a utilização da tecnologia em VRT poderá ser recomendada pela variação da densidade de sementes específica para cada zona de aplicações estabelecida. Normalmente, adotam-se como referência as manchas com plantas de menor desenvolvimento (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011).

2.10 Índice de vegetação – NDVI

Os índices de vegetação (IVs) são transformações das mensurações da atividade vegetativa, utilizando as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR - *Near Infrared*) (SHIRATSUCHI et al., 2014). Dentre os vários índices de vegetação espectrais, o mais conhecido é o NDVI, e através dele determinam-se parâmetros agrônômicos, como o índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila e biomassa verde (JENSEN, 2009).

O NDVI (índice de diferença de vegetação normalizado) está relacionado à quantidade de biomassa verde, teor e conteúdo de pigmento e estresse hídrico (ROUSE et al., 1973). A quantidade de clorofila da folha pode ser estimada através da combinação de diferentes índices espectrais (SHIRATSUCHI et al., 2014).

A espectrometria óptica identifica a intensidade com que cada material, seja um tipo de solo, de rocha ou de vegetação, reflete a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO et al., 2008). As propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser melhor avaliadas através de combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais (ATZBERGER, 2013), sendo esta captada por sensores óticos e sua leitura é processada internamente, calculando o NDVI (CORTINOVE et al., 2012) com a seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(Nir_{760} - Vis_{670})}{(Nir_{760} + Vis_{670})}^{-2}$$

onde:

NDVI = Índice de vegetação com diferença normalizada, adimensional, varia de -1 a +1;

Nir_{760} e Vis_{670} são as reflectâncias das bandas nos comprimentos de ondas de luz 760 e 670 nm.

As plantas de maneira geral apresentam baixa refletância e transmitância de radiação na faixa visível do espectro (400 a 700 nm), devido à forte absorção pelos pigmentos fotossintéticos (clorofila), principalmente na faixa do azul (~450 nm) e vermelho (~660 nm) (SOLARI, 2006). Por outro lado, há uma grande refletância e transmitância na região do infravermelho próximo (~700 a 1400 nm), sendo influenciada pela estrutura interna das folhas (EITEL et al., 2008).

O mapeamento da vegetação na superfície terrestre tem recebido grande destaque devido aos diversos índices de vegetação utilizados (NOVAIS et al., 2011). E, o mapeamento obtido através dos dados de NDVI estimando a variabilidade fenológica da cultura, pode ser usado como ferramenta da agricultura de precisão.

3. REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n.1, p. 71-91, 2004.

ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013.

BAIO, F. H. R.; SCARPIN, I. M.; ROQUE, C. G.; NEVES, D. C. Soil resistance to penetration in cotton rows and interrows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 6, p. 433-439, 2017.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J. & O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E. **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2. ed. New York, Marcel Dekker, p.377-403, 2001.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134-142, 2015.

BRANDÃO, S. L.; LIMA, S. C. pH e condutividade elétrica em solução do solo, em áreas de pinus e cerrado na chapada, em Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 3, n. 6, p. 1-11, 2002.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. 20, v. 2, 1309 p.

COELHO, A. M. **Agricultura de precisão**: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005, 59 p.

COELHO, J. P. C.; SILVA, J. R. M. Inovação e tecnologia na formação agrícola. In: **Agricultura de Precisão**. Lisboa: Associação dos Jovens Produtores de Portugal - AJAP, 2009, 141 p.

CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quinto levantamento, safra 2017/18**. Brasília, fev.2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_02_08_17_09_36_fevereiro_2018.pdf>. Acesso em: 8 fev 2018.

CORTINOVE, L.; TAUBINGER, L.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Densidade de coleta de dados com sensor ótico ativo para adubação nitrogenada em cana-de-açúcar, milho e trigo. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, Ribeirão Preto – SP. **Anais...** Ribeirão Preto, 2012.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1, p. 11-43, 2005.

DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 1836-1844, 2012.

EITEL, J. U. H.; LONG, D. S.; GESSLER, P. E.; HUNT, E. R. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, 2008.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013**. 21. ed., Londrina: Embrapa Soja, 2011. 262p.

ESS, D. R.; MORGAN, M. T.; PARSONS, S. D. Implementing Site-Specific Management: Map-Versus Sensor-Based Variable Rate Application. In: *The Precision Farming Guide for Agriculturists*, **John Deere Publishing**, Moline-IL, 2001. 117 p. Disponível em: < www.extension.purdue.edu/extmedia/AE/SSM-2-W.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2018.

FAULIN, G. D. C. **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo**. 52p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2005.

FRAISSE, C. W.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 44, n. 1, p.155-166, 2001.

GARRIDO, L. R.; MADEJÓN, E.; MURILLO, J. M.; MORENO, F. Soil quality alteration by mouldboard ploughing in a commercial farm devoted to no-tillage under Mediterranean conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, n.1, p. 182-190, 2011.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

KING, J. A.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, R. M.; WHEELER, H. C.; BRADLEY, R. I.; MAYR, T. R. Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 2, p.167-181, 2005.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. Implantação e manejo do sistema plantio direto. Passo Fundo, **Embrapa-CNPT**, 2000. 36p.

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. ed., 2000, p. 1-10, Minnesota. **Proceedings...** Minnesota: University of Minnesota, 2000.

LUCHIARI JUNIOR, A.; BORGHI, E.; AVANZI, J. C.; FREITAS, A. A.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O.; UMMUS, M. E.; INAMASU, R. Y. Zonas de Manejo: teoria e prática. In: **Agricultura de precisão: Um novo olhar**, São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação. p. 60-64, 2011.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão: Boletim Técnico**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília - DR, 36 p, 2013. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf>>. Acesso em: 12 fev 2018.

MOLIN, J. P. Desafios da agricultura brasileira a partir da agricultura de precisão. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 3. ed., 2002, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Potafós, 2002. Disponível em:[http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/54f495ffab600eaa83257b0900456a4a/\\$FILE/Palestra%20do%20Jose%20Molin.pdf](http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/54f495ffab600eaa83257b0900456a4a/$FILE/Palestra%20do%20Jose%20Molin.pdf)>. Acesso em: 8 jan. 2018.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 567- 573, 2008.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011.

MORETTI, D. LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; LOVATTI, M. J.; AGUIAR, L. I. G. Avaliação espaço-temporal das armazenagens gravimétrica e volumétrica da água num latossolo com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n.6, p. 1281-1290, 2007.

NASCIMENTO, E. F.; BASSOI, L. H.; RABELLO, L. M. Definição da malha de amostragem da condutividade elétrica do solo para obtenção de zonas de manejo em pomar de videira. **Agricultura de Precisão: Resultados de Um novo olhar**. 1. ed. p. 413-422, Embrapa, 2014.

NOVAIS, L. R., LIMA, A. C., RODRIGUES, J. A., COSTA, A. M. S.K, BORGES, E. F., ANJOS, C. S. Análise da vegetação da Área de Preservação Ambiental de São Desidério - BA, a partir do NDVI e NDWI. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2011, Curitiba-PR. **Anais...** Curitiba: INPE, p.1888, 2011.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed., São Paulo: Edgard, p.351-357, 2010.

PRADO, E. V.; MACHADO, T. A; PRADO, F. M. T. Geração e correção de zonas de manejo usando sensor spad e condutividade elétrica aparente do solo para a cafeicultura irrigada na zona da mata mineira. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.1, n. 27, p. 1-7, 2015.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Proc. 3. ed. **Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium**, Washington-DC: NASA SP-351, NASA, v. 1, p. 309–317, 1973.

SAFFIH-HDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y. J.; TANG, A. M.; CHAPLAIN, V. An evaluation of the susceptibility of french surface layers soil to compaction at various water contents and bulk densities. **Soil & Tillage Research**, v. 105, n.1, p.96-103, 2009.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência dos Solo**, v. 34, n.1, p. 659-667, 2010.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: **Agricultura de precisão: Resultado de um novo olhar**, Brasília-DF: Embrapa Instrumentação, p. 58-73, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n.4, p.689-698, 2015.

SOLARI, F. **Developing a crop based strategy for on-the-go nitrogen management in irrigated cornfields**. 157p. Thesis (PhD). University of Nebraska, Lincoln, 2006.

SUZUKI, L. E. A. S., REICHERT, J. M., REINERT, D. J., LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência dos Solo**, v. 32, n.1, p. 487-494, 2008.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural** [Online], v. 32, n.1, p. 159-163, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v32n1/a27v32n1.pdf>>. Acesso em 14 jan. 2018.

USDA-FAS. United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**, 2018. Disponível em:< <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>> Acesso em: 18 de fev de 2018.

VAZQUEZ, G. H.; CARVALHO, N. M.; BORBA, M. M. Z. Redução na população de plantas sobre a produtividade e a qualidade fisiológica da semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 01-011, 2008.

VELANDIA, M.; REJESUS, R. M.; BRONSON, K.; SEGARRA E. Economics and Marketing: Economics of Management Zone Delineation in Cotton Precision Agriculture. **The Journal of Cotton Science**, v. 12, n.3, p. 210–227, 2008.

VERIS TECHNOLOGIES. 2018. Disponível em: <<http://www.veristech.com/the-sensors/p4000>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2018.

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLFE, E. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. NDVI temporal series from the SPOT Vegetation sensor and SAM algorithm applied to sugarcane mapping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012.

VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R.; COUTINHO, A. C.; KASTENS, J.; BROWN, J. C. Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012.

YORINORI, J. T. Soja: ferrugem asiática avança e exige cuidados mais intensos. **Correio**, v.1, n. 1, p. 3-6, 2007.

CAPÍTULO 1 - Zonas de aplicação em função da condutividade elétrica aparente do solo para a variação na taxa de semeadura na cultura da soja.

Resumo

O gerenciamento eficiente e sustentável do agronegócio da soja necessita de medidas para suprir a demanda crescente por alimento, e para isso são utilizadas as tecnologias da agricultura de precisão. Assim, este trabalho teve como objetivo estudar a semeadura da soja em taxas diferenciadas, em zonas de aplicação determinadas pelo mapeamento da condutividade elétrica aparente (CEa) do solo e suas relações com a fenologia da planta e produtividade. A CE do solo foi diagnosticada através da sonda do Veris P4000 nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Foi realizado o mapeamento da área e delimitação em zonas de aplicações. O manejo foi específico para cada zona, em taxas diferenciadas de sementes. Foram coletadas também informações da compactação do solo. O experimento foi conduzido na safra de 2016/2017 em Chapadão do Sul – MS. O delineamento foi inteiramente casualizado, com seis repetições em cada tratamento. A população de plantas variou entre 311, 360 e 422 mil plantas ha⁻¹ e a população fixa foi de 360.000 plantas ha⁻¹. A região com menor potencial produtivo recebeu a maior população de sementes, 422 mil sementes por hectare, e na região com maior potencial de vigor de plantas e recebeu a menor população de sementes, 311 mil sementes de soja por hectare. Foram realizadas análises de altura da planta, índice de vegetação (NDVI) aos 50, 66 e 92 dias após a emergência, massa de 100 grãos e produtividade de grãos. Foram realizadas análises geoestatística para estudar a variabilidade espacial. Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo estimado o contraste entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional, correlações de Pearson e análise de componentes principais. Todas as variáveis apresentaram dependência espacial. Houve diferença no contraste entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional no manejo das diferentes populações de sementes. A variação na população de sementes proporcionou igualdade na produtividade.

Palavras chave: População de Sementes. Tecnologia de Taxa Variável (VRT). NDVI. Resistência Mecânica do solo à Penetração.

CHAPTER 1 – Application Zones in function of the apparent electrical conductivity of the soil for the variation in the sowing rate in the soybean crop.

Abstract

The efficient and sustainable management of soybean agribusiness needs measures to meet the growing demand for food, using precision agriculture technologies. The objective of this work was to study soybean sowing at different rates, in application zones determined by the mapping of the apparent electrical conductivity (CEa) of the soil and its relationship with plant phenology and productivity. Soil EC was diagnosed using the Veris P4000 probe at depths of 0-0,2, 0,2-0,4 and 0,4-0,6 m. Area mapping and delimitation were performed in application zones. The management was specific for each zone, at different seed rates. Information on soil compaction was also collected. The experiment was conducted in the 2016/2017 harvest in Chapadão do Sul - MS. The design was completely randomized, with six replicates in each treatment. The plant population varied between 311, 360 and 422 thousand ha⁻¹ plants and the fixed population was of 360,000 ha⁻¹ plants. The region with the least productive potential received the largest seed population, 422,000 seeds per hectare, and in the region with the highest potential of plant vigor and received the lowest seed population, 311,000 soybean seeds per hectare. Analysis of plant height, vegetation index (NDVI) at 50, 66 and 92 days after emergence, 100 grain mass and grain yield were performed. Geostatistical analyzes were performed to study spatial variability. The data were submitted to analysis of variance, estimating the contrast between precision agriculture versus conventional agriculture, Pearson correlations and principal components analysis. All variables presented spatial dependence. There was a difference in the contrast between precision agriculture versus conventional agriculture in the management of different seed populations. The variation in the seed population provided a productivity equality.

KEY WORDS: Seed Population, Variable Rate Technology (VRT), NDVI, Mechanical Resistance of Soil to Penetration.

Introdução

A cultura da soja (*Glycine max.* L. Merrill) é a leguminosa cultivada de maior importância no mundo, importante na economia brasileira devido ao grande volume produzido e exportado, e tem grande participação na dieta alimentar [1-2]. Com o aumento da população e a demanda crescente por alimento, o desafio constante é produzir mais com sustentabilidade. Para isso, é preciso maior eficiência na gestão da lavoura e com adoção de tecnologias com maior precisão para manejos adequados [3].

A produtividade da soja pode ser afetada por diversos fatores existentes no ambiente, e a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) pode ser utilizada como indicador no monitoramento de características do solo, como salinidade, textura, umidade, densidade, matéria orgânica e CTC, em função da variabilidade na composição físico-química do solo, apresentando diferentes níveis da capacidade de material em conduzir corrente elétrica [4]. Na tentativa de desenvolver técnicas para medir indiretamente as propriedades do solo, têm sido estudados sistemas ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, fluxo de ar e acústicos [5].

Alguns desses princípios de funcionamento podem ser encontrados no equipamento Veris P4000 (Salina, KS, EUA), que em contato com o solo mensura sua CEa em profundidade através de uma sonda hidráulica com sensores, adquirindo medidas espectrais na faixa do visível e do infravermelho próximo [6].

Os mapas com base na variabilidade da CEa de uma região da lavoura, permitem identificar áreas com propriedades semelhantes e delimitar unidades de gerenciamento [7-8], sendo estas chamadas de zonas de aplicação. Essa estratégia pode aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais e reduzir o impacto da agricultura no ambiente [9].

As intervenções de manejo devem ser prescritas especificamente para cada zona considerando os fatores limitantes da produtividade, com aplicações diferenciadas como, por exemplo, as VRT (Tecnologia de Taxa Variável), que consideram as informações recolhidas em cada unidade, em um determinado instante e parcela de terreno [10].

A população de plantas pode variar de acordo com as características do solo, onde as condições são mais favoráveis para o crescimento das culturas, pode-se aumentar a quantidade de sementes ou plantas por unidade de área. Também podem ocorrer condições particulares, como manchas de solo contendo historicamente plantas de menor desenvolvimento. Em casos assim, é recomendado o aumento da densidade de semeadura.

Desta forma, a utilização da tecnologia em VRT poderá ser recomendada pela variação da densidade de sementes específica para cada zona de aplicações estabelecida [9-10].

As diferenças de populações acarretam variações na fenologia da planta de soja. O aumento da população de plantas na linha de plantio aumentar a velocidade de emergência de plântulas de soja reduz o número de legumes e diminui o número de grãos por planta, promove também maior altura final de plantas, podendo influenciar no acamamento [11]. Maiores índices de área foliar foram observados em tratamentos referentes às maiores populações de plantas de soja por hectare [9].

A cultura da soja é capaz de suportar grandes reduções de população sem perdas significativas de produtividade [12-13]. Assim, o estudo da semeadura em VRT é importante para a compreensão do grau de influência da agricultura de precisão e convencional na produtividade da soja.

Este trabalho teve como objetivo estudar a semeadura da soja em VRT, em zonas de aplicação determinadas pelo mapeamento da CEA do solo e suas relações com a fenologia da planta e produtividade.

Material e métodos

O experimento foi conduzido na área experimental na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, situada nas coordenadas geográficas S: 018° 77' 19" e W: 052° 62' 10", a uma altitude média de 810 m, em Chapadão do Sul – MS, no ano agrícola 2016/17. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico [14]. O clima da região é classificado segundo Koppen, do tipo Aw, definido como tropical úmido, com chuva no verão e seca no inverno (Fig. 1) [15]. Entre os meses de novembro de 2016 a março de 2017 a média por decêndio da precipitação esteve entre de 27 e 209 (mm) e a temperatura entre 21 e 25°C.

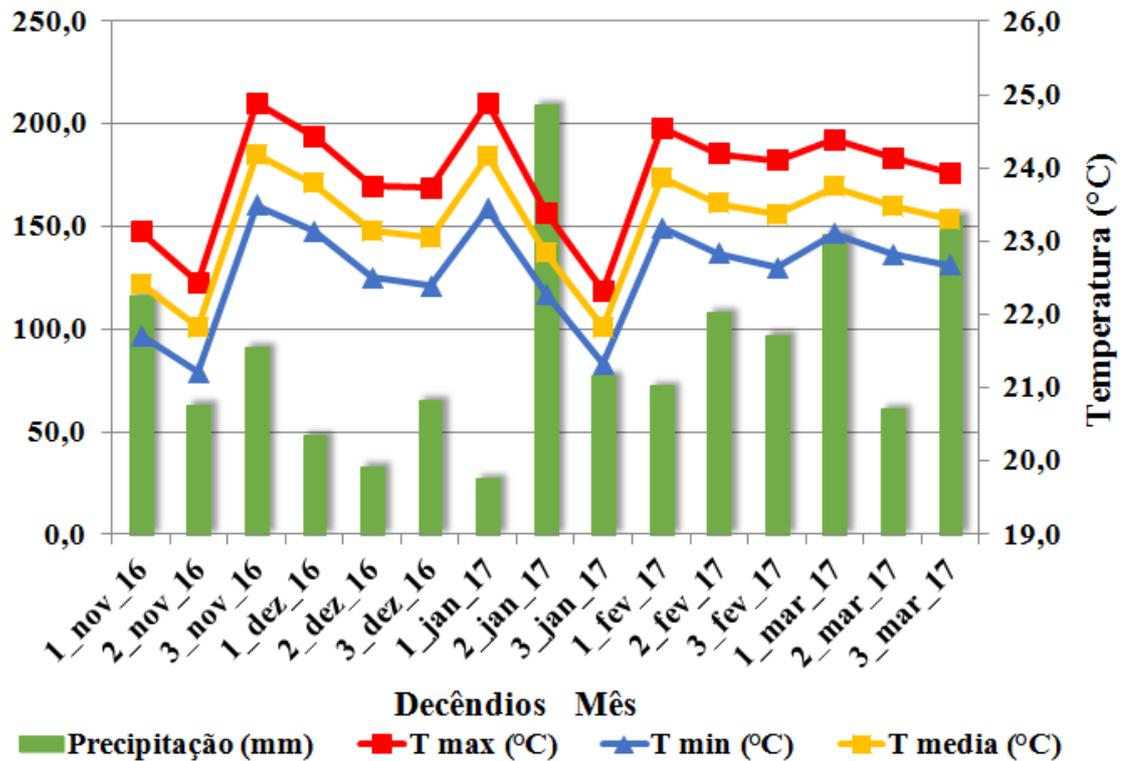


Fig. 1 Média da precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima, mínima e média (°C) a cada decêndio, durante o período da cultura da soja no campo. Chapadão do Sul-MS, safra 2016/17.

Para a definição das diferentes zonas de aplicações foram coletados dados de condutividade elétrica aparente (CEa) no perfil do solo com auxílio de um sensor em tempo real, Veris modelo P4000 (Salina, KS, EUA). Esse equipamento possui uma sonda hidráulica com um conjunto de eletrodos, os quais enviam um sinal elétrico através do solo, indicando a condutividade elétrica aparente em cada profundidade [5].

Para o estudo da variabilidade da produtividade final da cultura, foram coletado dados de compactação do solo em kPa até a profundidade de 0,6 enquanto o solo se encontrava na capacidade de campo. As leituras foram realizadas no perfil do solo de 0,02 em 0,02 m, através da sonda do Veris P4000 que possibilitou a aquisição dos dados de resistência mecânica à penetração (RP) através de uma célula de carga, a qual mede a força de inserção da sonda no solo [6].

A amostras de CEa e RP foram georeferenciadas, pois o equipamento P4000 possui um dispositivo GNSS para georreferenciamento dos pontos amostrais. Esse implemento foi acoplado a um trator Valtra, modelo BL88, o qual fornecia energia hidráulica e elétrica a sistema. Os valores de CEa e RP foram amostrados em 78 pontos de uma grade retangular de

6 x 7 m. Foram elaborados os mapas de CEa nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. O método de interpolação foi pela krigagem ordinária que foram ajustados através do programa ArcGis 10.4 (ESRI, Redlands, CA, USA).

Foram coletadas amostras deformadas em uma profundidade de 0,0-0,2 m para análise da física de solo em laboratório, para posterior comparação com os dados de resistência mecânica do solo à penetração. E foram realizadas análises da fertilidade do solo (Tabela 1). Essas análises foram realizadas após a implantação do experimento apenas para fins de observação dos componentes químicos que influenciam na CEa do solo.

Tabela 1. Média dos resultados das análises químicas do solo.

pH	H+Al	Ca	Mg	Al	CTC	B	Cu	Fe	Mn	Zn	K	P	MO	Arg	V%	m%
	cmolc dm ⁻³					mg dm ⁻³						g dm ⁻³		%		
4,41	7,2	1,8	0,3	0,4	9,4	0,5	0,9	75,5	9,0	3,9	62,5	15,6	23,6	456,7	23,6	16,3

pH CaCl₂; H+Al: Acidez potencial; Ca:Cálcio; Mg:Magnésio; Al:Alumínio; CTC:Capacidade de troca catiônica; B:Boro; Cu:Cobre; Fe:Ferro; Mn:Manganês; Zn:Zinco; K:Potássio; P:Fósforo (resina); M.O:Matéria Orgânica; Arg: Argila; V%: Saturação por base; m%: Saturação por alumínio.

Foi determinada a umidade gravimétrica do solo pelo método de secagem da amostra em forno convencional (estufa) numa temperatura de 110 °C, em um intervalo de 24 horas. O teor de argila foi realizado conforme a metodologia de análise granulométrica (dispersão total) [16].

Com o mapa da CEa na profundidade 0,0 a 0,2 m foram estabelecidas as três zonas de aplicações, e as taxas de semeadura em VRT foram instaladas em três populações de plantas nas três zonas de aplicações (Fig. 2). A população fixa foi de 360.000 plantas ha⁻¹. No tratamento em VRT de sementes, a população final de plantas variou entre 311, 360 e 422 mil plantas por hectare (20% em torno da população média), baseados em estudos já realizados de população de plantas em condições ambientais [11-17].

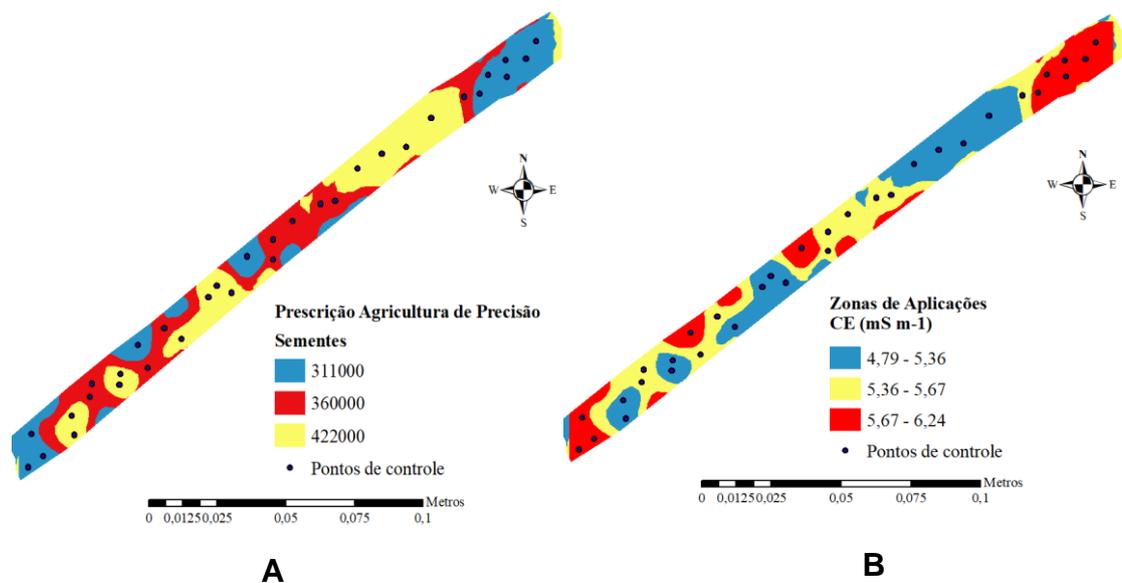


Fig. 2 Distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo (A), mapa de prescrição de sementes em VRT (B) e os pontos amostrais com três classes.

A região com menor potencial produtivo recebeu a maior população de sementes, 422 mil sementes por hectare, em função da potencialidade de crescimento de plantas de menor massa vegetal e índice de vegetação. A região de maior condutividade elétrica aparente do solo representou maior potencial de vigor de plantas e recebeu a menor população de sementes, 311 mil sementes de soja por hectare.

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizados, com seis repetições em cada tratamento (*Variable Rate Technology* - VRT de sementes versus população fixa de sementes). A adubação de base foi realizada de acordo com a análise de solo, seguindo as recomendações para o cultivo no cerrado. Na pré-semeadura foi aplicado a lanço 150 kg ha⁻¹ de Cloreto de Potássio (00-00-60). Na semeadura foram aplicados 335 kg ha⁻¹ do formulado NPK (05-25-15).

Os tratamentos fitossanitários e aplicações de insumos agrícolas durante o desenvolvimento da cultura foram realizados pelo monitoramento e padrões para controle de pragas e doença da região. Todos os tratamentos culturais como a pulverização de herbicida, inseticida, fungicida e adubação, foram realizados conforme necessidade e recomendação na cultura da soja para a região [13].

A semeadura da soja foi realizada no dia 16 de novembro de 2016, em uma área de 1 ha com histórico de 15 anos utilizando o sistema plantio direto, tendo o milho como cobertura

vegetal da safra anterior. A cultivar de soja (*Glycine max.* L. Merrill) utilizada foi a Desafio 8433 RR da empresa Brasmax, a qual possui hábito de crescimento indeterminado e ciclo médio de 110 dias. O espaçamento utilizado foi de 0,45 m entre linhas.

Para a análise fenológica em cada ponto de amostragem, foi medido a altura da planta (ALT) e índice de vegetação (IV) em cinco plantas que foram marcadas para identificação nas futuras avaliações. A altura das plantas foi mensurada aos 46, 58, 66 e 92 dias após a emergência. E o índice de vegetação aos 50, 66 e 92 DAE em diferentes estádios fenológico da cultura da soja.

A altura de cada planta foi medida no tronco principal da superfície do solo até o ponto de inserção da última folha totalmente expandida. A diferença dos índices de vegetação NDVI foi mensurada pelo uso do equipamento Crop Circle modelo ACS-470 (Holland Scientific, Lincon, NE) utilizando os filtros: 670 nm (*red*); 730 nm (*RedEdge*); e 760 nm (*NIR*). Esse equipamento possui três canais de medição óptica da refletância, associado ao posicionamento de seu GPS integrado. O sensor mede respectivamente a refletância da cultura em três comprimentos de onda de acordo com as lentes selecionadas para mensuração. O escaneamento da área foi realizado manualmente a uma altura de 0,8 m do dossel das plantas.

Foram definidos 33 pontos nas diferentes zonas de aplicação para a aferição dos índices fenológicos e produtividade. A interpolação dos 33 pontos amostrais ocorreu pelo uso do interpolador por krigagem ordinária. A navegação nos pontos de amostragem foi possível por meio do GNSS Trimble Nomad (Sunnyvale, EUA). A colheita foi realizada manualmente em cada ponto amostral em uma área de 4,05 m². Foi realizada a pesagem por parcela e corrigido a umidade a 14%. Após, calculou-se o peso médio da massa de 100 grãos.

A análise geoestatística para determinação dos semivariogramas e a elaboração dos mapas da CEa, RP e IV foram realizadas pelo programa computacional ArcGis 10.4 (ESRI, Redlands, CA, USA). Os mapas obtidos permitiram uma análise visual da variabilidade dos atributos estimado.

Índice de dependência espacial (DE) dos modelos dos semivariogramas foi calculado através da porcentagem da variância do efeito da pepita, pois esta indica a variabilidade que não pode ser explicado e representa o erro analítico [18]. A dependência espacial foi constatada através de ajustes de semivariogramas [19] levando em conta a inferência de processo estacionário intrínseco, que é estimado por:

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

Onde:

$N(h)$ - número de pares experimentais observados.

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por uma distância h .

O $\gamma(h)$ é o semivariograma estimado. Para o ajuste do modelo matemático dos valores calculados de $\gamma(h)$, os coeficientes do modelo teórico foram: efeito pepita (C_0); patamar (C_0+C_1); e o alcance. O grau de dependência espacial dos atributos estudados foi analisado segundo a classificação que considera os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para $DE < 25\%$, moderada para $25\% < DE < 75\%$ e forte para $DE > 75\%$ [20].

A metodologia empregada na interpolação dos dados amostrados, para as variáveis com dependência espacial tiveram os modelos teóricos do semivariograma baseados na soma residual dos quadrados, que foram: exponencial e esférico, que estimou a CEa e RP em distintas profundidades, e NDVI mensurado em diferentes dias após a emergência em pontos não medidos.

Após verificar homogeneidade entre variâncias residuais de cada experimento, os dados foram submetidos à análise de variância, sendo estimado o contraste entre agricultura de precisão (populações de 311.000, 360.000 e 422.000 plantas ha^{-1}) *versus* agricultura convencional (360.000 plantas ha^{-1}). Posteriormente, foi realizada análise de componentes principais e estimadas as correlações de Pearson entre as variáveis com o software Rbio [21].

Para expressar graficamente a relação funcional entre as estimativas dos coeficientes de correlações foi utilizada a rede de correlações, em que a proximidade entre os nós (traços) é proporcional ao valor absoluto da correlação entre esses nós. A espessura das bordas foi controlada por aplicação de um valor de corte igual 0,60, o que significa que apenas $|r_{ij}| \geq 0,60$ têm as suas arestas em destaque. Finalmente, correlações positivas foram destacadas na cor verde, enquanto as negativas foram representadas em vermelho. Esta análise foi realizada com software Rbio [21].

Resultados e Discussão

Análises geoestatística

A análise geoestatística com o objetivo de estudar a variabilidade espacial e interpolar as zonas de aplicações através da condutividade elétrica aparente do solo, as variáveis dos atributos fenológicos da soja e a resistência mecânica do solo à penetração, foi realizada utilizando os atributos mais correlacionados com a produtividade, de acordo com os resultados da análise de correlação de Pearson. A Tabela 2 mostra os parâmetros e os modelos de semivariogramas ajustados aos dados de amostra selecionados a fenologia da soja, para definição das zonas de aplicações e resistência mecânica do solo a penetração.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas para os dados fenológicos do índice de vegetação da soja de maior correlação com a produtividade, condutividade elétrica aparente e resistência mecânica do solo a penetração.

	Modelo	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (m)	DE	r
NDVI 50 DAE	Exponencial	0,0012	0,0018	35,28	0,35	0,67
NDVI 66 DAE	Exponencial	0,0004	0,0006	22,04	0,36	0,43
NDVI 92 DAE	Exponencial	0,0005	0,0026	12,25	0,81	0,85
CEa 0,0-0,2 m	Esférico	0,4382	1,5111	64,70	0,71	0,87
CEa 0,2-0,4 m	Exponencial	0,0000	3,8100	21,27	1,00	0,46
CEa 0,4-0,6 m	Exponencial	0,3574	1,0212	24,91	0,65	0,57
RP 0,0-0,2 m	Esférico	0,0000	5,2901	53,31	1,00	0,53
RP 0,2-0,4 m	Exponencial	1,3984	3,6800	68,29	0,62	0,95
RP 0,4-0,6 m	Exponencial	0,0000	1,9228	49,97	1,00	0,47
Produtividade	Exponencial	0,0000	3,8105	24,91	1,00	0,45

CEa: Condutividade elétrica aparente do solo; RP: Resistência mecânica do solo a penetração; DE: Dependência espacial $[1-(C/Co+C)]$; r : Coeficiente de regressão da validação cruzada.

As propriedades que apresentaram dependência espacial foram ajustadas ao modelo exponencial para NDVI aos 50, 66, 92 DAE, condutividade elétrica aparente do solo mensurada nas profundidades de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, resistência mecânica do solo a penetração a 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, e produtividade. Para a CEa e RP na profundidade de 0,0-0,2 m o modelo esférico o foi determinado.

Todas as variáveis apresentaram dependência espacial (DE). O NDVI mensurado aos 50 e 66 DAE, a CEa em 0,0-0,2 e 0,4-0,6 m de profundidade e a RP em 0,2-0,4 m de profundidade, apresentaram dependência espacial moderada (de 25% a 75%). As variáveis

NDVI medido aos 92 DAE, CEa na profundidade 0,2-0,4 m, RP nas profundidades 0,0-0,2 e 0,4-0,6 m e a produtividade mostraram DE forte ($> 75\%$). Esses resultados são importantes porque a DE indica a variabilidade ajustada, e pelo modelo teórico de semivariograma, possível de aplicar a interpolação pela metodologia de krigagem ordinária [22].

Dentre os parâmetros importantes no estudo do semivariograma, o alcance é o mais relevante, por revelar a distância limite da dependência espacial, ou seja, distância máxima na qual uma variável está correlacionada espacialmente. O alcance mapeado garante que todos os vizinhos (dentro de um raio) tenham continuidade espacial e possam ser usados para estimar valores em qualquer posição entre eles [23].

Os valores de alcance mais baixos foram de 12,25 e 21,27 m para as variáveis NDVI aos 92 DAE e CEa na profundidade 0,2-0,4 m, respectivamente. E os alcances mais altos foram observados na RP a 0,2-0,4 m de profundidade com 68,29 m, e na CEa na profundidade de 0,0-0,2 m com o alcance de 64,70 m. Nesse estudo foi constatada baixa magnitude do efeito pepita (Co), que representa a variância não explicada, ou ao acaso, frequentemente causada por erros de medições ou variações das propriedades que não podem ser detectadas na escala de amostragem [19].

Pesquisadores afirmam que, quando não é possível identificar a estrutura da variância e os valores da semivariância se mantêm a um determinado nível, procedendo de forma parcialmente constante, independentemente do aumento da distância entre amostras, este semivariograma apresenta efeito pepita puro [24]. Assim, pode-se assumir que, além de a distribuição ocorrer completamente ao acaso, há independência entre as amostras e os métodos da estatística clássica que podem ser aplicados, com a média aritmética representando bem o conjunto de dados [25].

Contrastes entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional

Os contrastes entre os resultados obtidos nos tratamentos agricultura de precisão e a agricultura convencional para a variável NDVI avaliada em diferentes dias após a emergência são apresentados na Tabela 3. Houve significância do contraste aos 92 DAE, indicando diferença entre os manejos das diferentes populações de sementes para esta variável.

Tabela 3. Valores de F calculado para a variável NDVI avaliada em diferentes dias após a emergência da cultura da soja cultivada sob agricultura de precisão (AP) e convencional.

FV	NDVI		
	50 DAE	66 DAE	92 DAE
AP	1,84 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,95 ^{ns}
Convencional	1,24 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,95 ^{ns}
AP vs. Convencional	0,18 ^{ns}	0,29 ^{ns}	5,71*
Média geral	0,89	0,89	0,70
CV (%)	1,39	1,59	4,19

^{ns} e *: não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; FV: fontes de variação; CV: coeficiente de variação.

O coeficiente de variação (CV) verificado para a variável NDVI aos 50, 66 e 92 DAE foram baixos, de 1,39%, 1,59% e 4,19%, respectivamente (Tabela 3). O CV é a medida da precisão em experimentos e, como regra geral, experimentos feitos em campo devem ter o CV em torno de 30% [26]. Quanto menor for o coeficiente de variação maior será a homogeneidade dos dados, isto é, mais preciso [27].

A diferença de massa foliar refletiu no índice de vegetação NDVI somente aos 92 DAE, sendo as outras aferições, aos 50 DAE e 66 DAE, não significativas. Tal fato pode ser em decorrência de vários elementos que compõem a superfície do solo (matéria orgânica, textura, composição mineralógica, rugosidade e umidade) estando estes presentes na entre linha da cultura quando a mesma ainda não fechou completamente, podendo afetar a reflectância do dossel interferindo na resposta espectral e, conseqüentemente, na determinação do NDVI [28].

A Fig. 3 demonstra que aos 92 DAE a agricultura convencional apresentou maiores médias de NDVI em relação à agricultura de precisão. Esse resultado pode ser explicado devido ao fato de que nesse período da cultura, as plantas já estão de tamanhos uniformes sem variação na densidade das mesmas, limitando a percepção das mudanças do NDVI [29-30]. Por esse motivo não foi possível verificado contrastes significativos aos 50 DAE e 66 DAE.

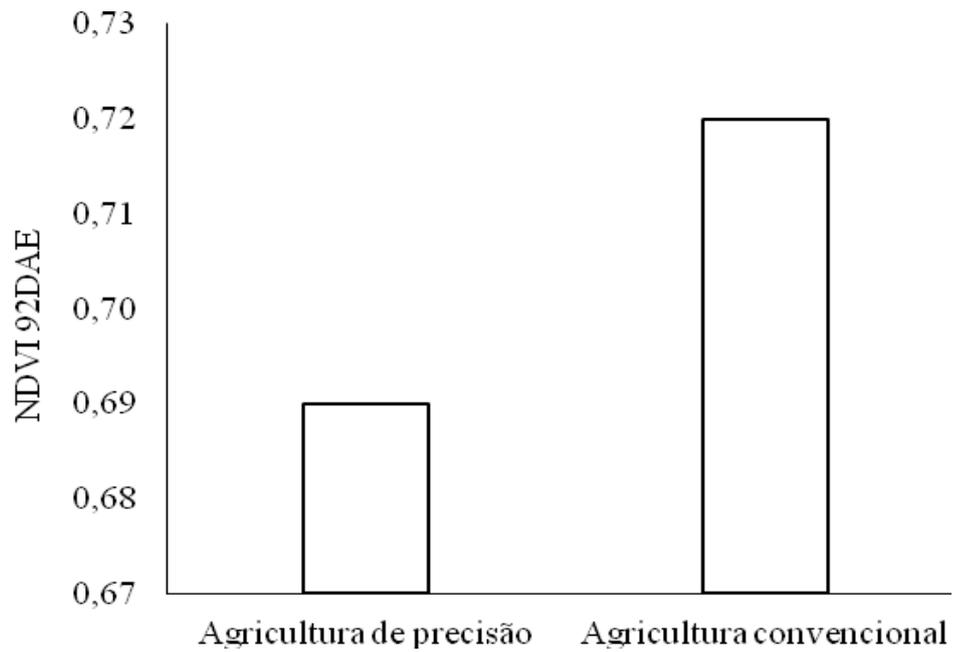
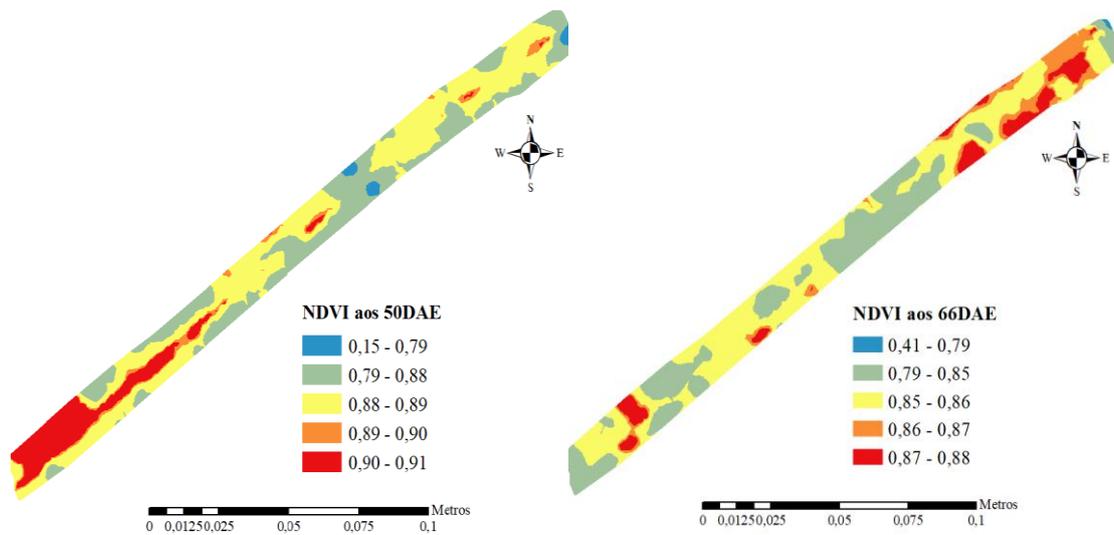


Fig. 3 Contrastes entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional para o NDVI aos 92 dias após a emergência (DAE).

Os mapas gerados (Fig. 4) apresentam a variabilidade espacial do índice de vegetação, NDVI aos 50, 66 e 92 DAE, que possibilitou analisar a distribuição espacial da área cultivadas com soja, melhorou as observações de campo e promoveu melhor avaliação do potencial de produção.



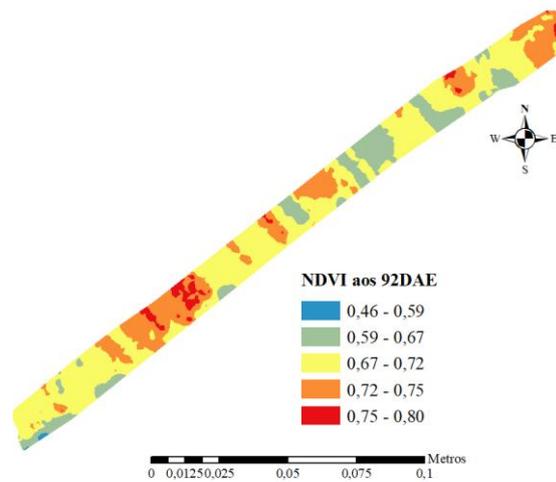


Fig. 4 Distribuição espacial do NDVI com cinco classes, de acordo com as leituras realizadas aos 50, 66 e 92 DAE.

O NDVI aumentou gradativamente dos 50 até os 66 DAE e aos 92 DAE houve um decréscimo no incremento de massa vegetal. Isso ocorreu porque a taxa de incremento de matéria seca na planta de soja aumenta gradativamente durante os estádios vegetativos de desenvolvimento até o R1. Em torno de R2, a taxa diária de acúmulo de matéria seca pela planta é constante, mas ocorre um gradativo decréscimo durante o período de enchimento de grãos (logo após R6) e terminando esse acúmulo após R6.5 [31].

Os contrastes entre agricultura de precisão e a agricultura convencional para as variáveis condutividade elétrica aparente do solo e resistência mecânica do solo a penetração avaliadas em diferentes profundidades (m) da cultura da soja, são apresentados na Tabela 4. O contraste da CEa foi significativo nas profundidades de 0,0-0,2 m e de 0,2-0,4 m, e para a RP a significância foi observada nos 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 cm de profundidade.

Tabela 4. Valores de F calculado para as variáveis de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e resistência mecânica do solo a penetração (RP) avaliadas em diferentes profundidades (m) da cultura da soja cultivada sob agricultura de precisão (AP) e convencional.

FV	CEa (mS m ⁻¹)			RP (kPa)		
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
AP	2,46 ^{ns}	9,36 ^{ns}	8,18 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,80 ^{ns}	1,81 ^{ns}
Conv	2,55 ^{ns}	3,11 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,10 ^{ns}	2,09 ^{ns}	4,55 ^{ns}
AP vs. Conv	37,28*	10,25*	2,73 ^{ns}	2,85 ^{ns}	20,78*	27,91*
Média geral	5,48	4,11	3,25	3040,24	2631,97	1851,65
CV (%)	4,10	7,11	12,72	12,20	7,45	7,82

^{ns} e *: não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; FV: fontes de variação; CV: coeficiente de variação.

A significância da CEa na camada superficial do solo (Tabela 4) é devido ao acúmulo da matéria orgânica que se restringe às camadas superficiais, influenciando as condições físicas, químicas e biológicas do solo [32]. O acúmulo de matéria orgânica no sistema de plantio direto promove um aumento expressivo na CTC do solo [33], sendo este um dos atributos que tem maior relação com a condutividade elétrica aparente do solo [32].

A condutividade elétrica aparente diminuiu, enquanto o coeficiente de variação aumentou com a profundidade do solo (Tabela 4). Essas diferenças de leituras na CEa podem estar associadas à diferença na constituição do perfil do solo entre as camadas monitoradas, a existência de regiões de maior resposta ao campo eletromagnético gerado, e a influência da umidade [34]. No entanto, nesse trabalho, a umidade não foi monitorada nas camadas de 0,2 a 0,4 m.

O solo com sua variabilidade na composição físico-química apresenta diferentes níveis de condutividade elétrica aparente, sendo essa afirmação comprovada por autores que obtiveram indícios claros em seu trabalho de que a CEa responde às variações na textura do solo e em seus teores de umidade [4].

No que se refere à resistência mecânica do solo à penetração e a profundidade, estas são diretamente proporcionais, dado que, à medida que a profundidade aumentou, o mesmo ocorreu com a RP (Tabela 4). A camada superficial menos compactada pode ser explicada pela descompactação no sulco causada pelas máquinas de fertilizantes, que promove a descompactação entre profundidades de 0,08 e 0,12 m e também devido ao facão (botinha) da semeadora [35].

O grau de compactação do solo pode ser expresso através da medição da resistência mecânica do solo à penetração, pois sua quantificação representa um importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas [36].

Na Fig. 5, foi observado que na agricultura convencional houve maior CEa em relação à agricultura de precisão nas duas profundidades significativas, 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. A condutividade elétrica aparente do solo medida por sensor de contato reflete adequadamente a variação nos teores de argila do Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, para uso na definição de zonas de manejo [37].

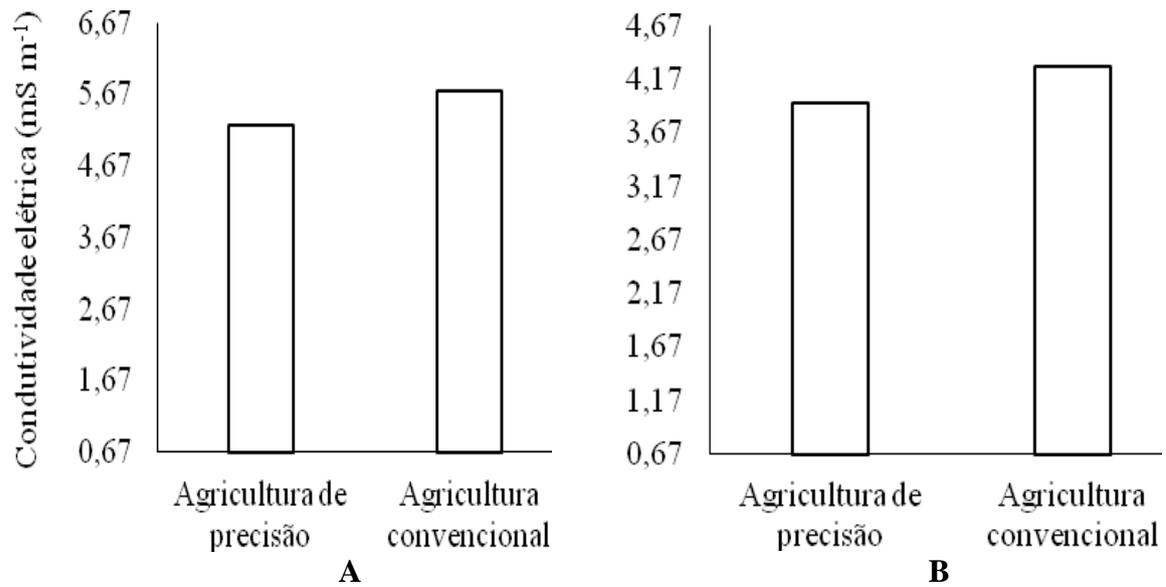


Fig. 5. Contrastes entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional para a condutividade elétrica aparente do solo (mS m⁻¹) nas profundidades de 0,0-0,2 m (A) e 0,2-0,4 m (B).

Na Fig. 6, foi observado que na agricultura de precisão houve maior RP em relação à agricultura convencional nas duas profundidades significativas, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m.

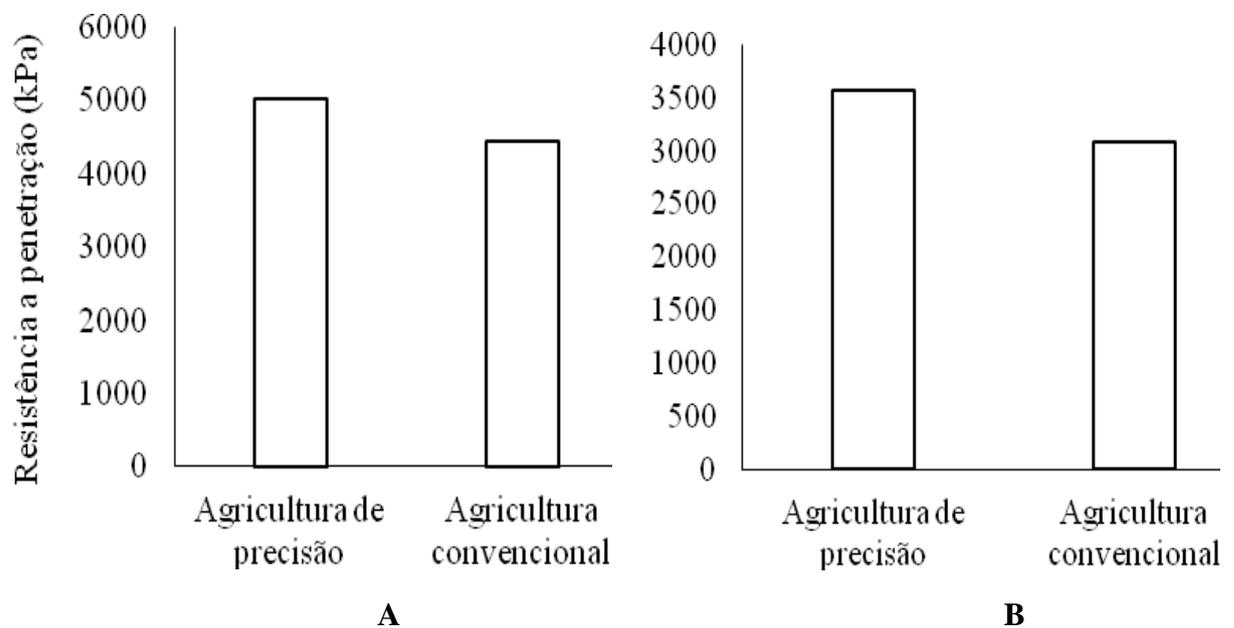


Fig. 6 Contrastes entre agricultura de precisão *versus* agricultura convencional para a resistência mecânica do solo à penetração (kPa) nas profundidades de 0,2-0,4 m (A) e 0,4-0,6 m (B).

Isso pode ter ocorrido devido às pequenas variações do teor de água (Fig. 7), o que pode ter implicado em incrementos da densidade até o teor de água limite para a máxima compactação do solo [38]. A caracterização da umidade do solo nos pontos de amostragem é importante no mapeamento de compactação porque, por si só, é um fator que interfere com os valores medidos de RP e, portanto, com sua variabilidade espacial [35].

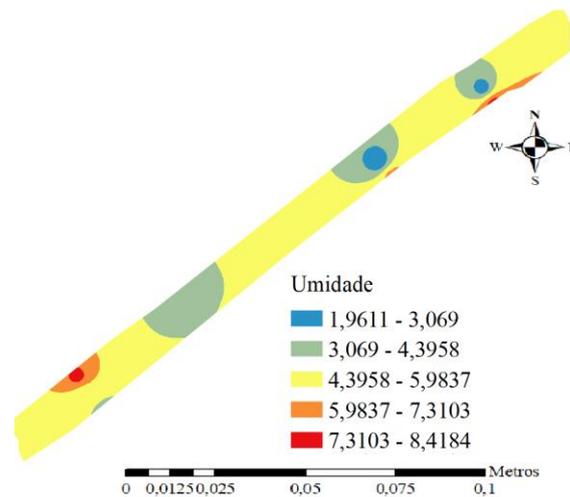


Fig. 7 Umidade gravimétrica do solo ($\theta\%$) adquirida pelo método de secagem da amostra em estufa, com cinco classes.

Para as variáveis altura de plantas (ALT) avaliado em diferentes dias após a emergência, massa de cem grãos (MCG) e produtividade de grãos (PROD) da soja não houve contraste significativo quando cultivada sob agricultura de precisão e convencional (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de F calculado para as variáveis altura de plantas (ALT) avaliado em diferentes dias após a emergência (DAE), massa de cem grãos (MCG) e produtividade de grãos (PROD) da cultura da soja cultivada sob agricultura de precisão (AP) e convencional.

FV	ALT (m)				MCG (g)	PROD (kg ha ⁻¹)
	46 DAE	50 DAE	66 DAE	92 DAE		
AP	2,24 ^{ns}	0,04 ^{ns}	4,14 ^{ns}	0,30 ^{ns}	2,21 ^{ns}	2,32 ^{ns}
Convencional	0,13 ^{ns}	0,41 ^{ns}	5,21 ^{ns}	0,23 ^{ns}	3,51 ^{ns}	1,71 ^{ns}
AP vs. Convencional	2,22 ^{ns}	0,29 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,36 ^{ns}	1,18 ^{ns}	0,94 ^{ns}
Média geral	63,94	79,53	82,62	87,93	15,24	3941,34
CV (%)	5,79	8,73	6,66	4,68	2,72	13,56

^{ns} e * : não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; FV: fontes de variação; CV: coeficiente de variação.

Esperava-se que na maior densidade populacional as plantas fossem mais altas, devido ao possível estiolamento causado pelo sombreamento, pois com o aumento da densidade de semeadura, aumenta a competição intraespecífica por luz, levando ao estiolamento nas maiores densidades [39]. No entanto, esse comportamento não foi verificado na altura das plantas avaliadas em diferentes estádios fenológicos (Tabela 5), ao qual não foi significativo em nenhuma população de plantas, 311, 360 e 422 mil plantas por hectare. Tal resultado também foi observado em um trabalho similar [40].

Apesar das parcelas de AP mostrarem menor CEa, indicando menor fertilidade potencial, e apresentarem maior compactação em profundidade, ainda assim, os índices NDVI aos 50 e 66 DAE mostraram-se iguais, ou seja, concordando com os resultados de altura da planta aqui constatados. Isso refletiu na produtividade, e ainda que os indicativos fossem contrários, com a menor CEa e alta RP, a produtividade foi igual, mostrando que fazer a variação da população de sementes proporcionou a igualdade na produtividade. Isso mostra que as zonas de aplicações foram bem estabelecidas e a agricultura de precisão foi similar à agricultura convencional.

Pesquisas constataram não haver efeito significativo para massa de grãos em função da densidade de semeadura da soja. Contudo, a densidade de plantio pode interferir na produtividade de grãos. Em baixas densidades, aumenta o número de vagens por planta, e o contrário também ocorre, com o aumento da densidade reduz o número de vagens por planta e número de grãos por vagem, mas eleva a produtividade final, sendo esta definida pela interação entre as plantas, o ambiente de produção e o manejo [40-41]. Isso está relacionado ao fato de que nas maiores densidades de semeadura há maior competição por luz e menor disponibilidade de fotoassimilados, fazendo com que a planta diminua o número de ramificações [39].

A produtividade de grãos é um caráter complexo e resultante da expressão e associação de diferentes componentes. A relação entre a MCG e a produtividade pode ser em função das características genéticas da cultivar e também pela interação diferenciada do ambiente sobre as relações de produtividade [42]. Autores relatam em seu trabalho baixas relações fenotípicas e genotípicas da MCG com a produtividade, podendo ser explicada pela compensação que a soja frequentemente promove, aumentando ou diminuindo o tamanho das sementes em função do número de vagens (de sementes) em desenvolvimento [42-43].

Esses resultados indicam que as diferenças entre os manejos avaliados influenciaram no comportamento agrônomo da soja. Isso possivelmente ocorreu devida a pequena

variação na população de plantas utilizada. E, um dos componentes da produção da planta que contribui para maior tolerância à variação na população é o número de vagens por planta, que varia ao aumento ou redução da população [44].

Em razão das condições de densidades estudadas a massa de grãos e a produtividade não foram influenciadas. Desse modo, entende-se que houve efeito compensatório, certamente que o menor número de vagens por planta, foi compensado pelo aumento da densidade populacional [44], considerando a pequena variação na população de plantas utilizada.

Correlação entre as variáveis analisadas e a produtividade

O coeficiente de correlação de Pearson (r) expressa a força da relação entre as variáveis. Os valores de $r = 0,10$ até $0,30$ é classificado como fraco, $r = 0,40$ até $0,6$ é moderado e $r = 0,70$ até 1 é forte. Assim, independente do sinal, quanto mais perto de 1 maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis. No outro oposto, quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação [45]. As correlações lineares entre as variáveis analisadas e a produtividade são apresentadas na Fig. 8.

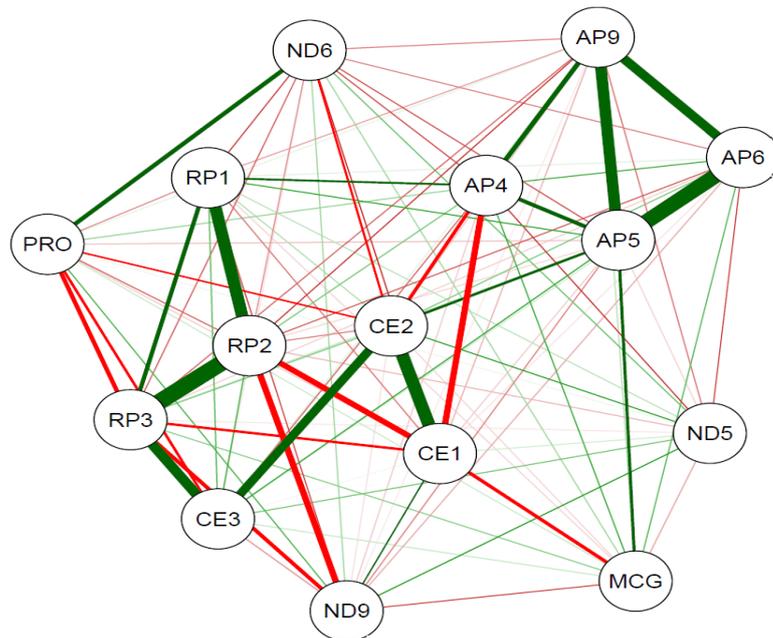


Fig. 8 Rede de correlações de Pearson entre a condutividade elétrica aparente do solo, resistência mecânica do solo à penetração, índice de vegetação (NDVI), propriedades fenológicas da soja e a produtividade da cultura.

PRO: Produtividade; MCG: Massa de Cem Grãos; RP1, RP2 e RP3: Resistência Mecânica do Solo a Penetração nas profundidades 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 metros, respectivamente; CE1, CE2 e CE3: Condutividade Elétrica Aparente do Solo nas profundidades 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 metros, respectivamente; ND5, ND6 e ND9: NDVI mensurado aos 50, 66 e 92 dias após a emergência, respectivamente; AP4, AP5, AP6 e AP9: Altura de Plantas mensuradas aos 46, 58, 66 e 92 dias após a emergência, respectivamente.

A maior correlação que influenciou positivamente na produtividade foi com a variável NDVI aos 66 DAE (Fig. 9). Isso pode ter ocorrido devido à diferença de massa foliar refletida no índice de vegetação NDVI nesse período, no qual, de certa forma, a quantidade dessa massa produzida pelas plantas influenciou na produtividade de grãos de modo que, em torno de R2, a taxa diária de acúmulo de matéria seca pela planta é constante, sendo os estádios R1 a R6 que descrevem melhor o desenvolvimento da planta. O acúmulo da massa vegetal depende da assimilação de nutrientes pelas plantas ao longo de seu ciclo, sendo evolutivo até o estágio final de produção e decresce após o enchimento de grãos, sendo responsável pela produtividade da soja [31].

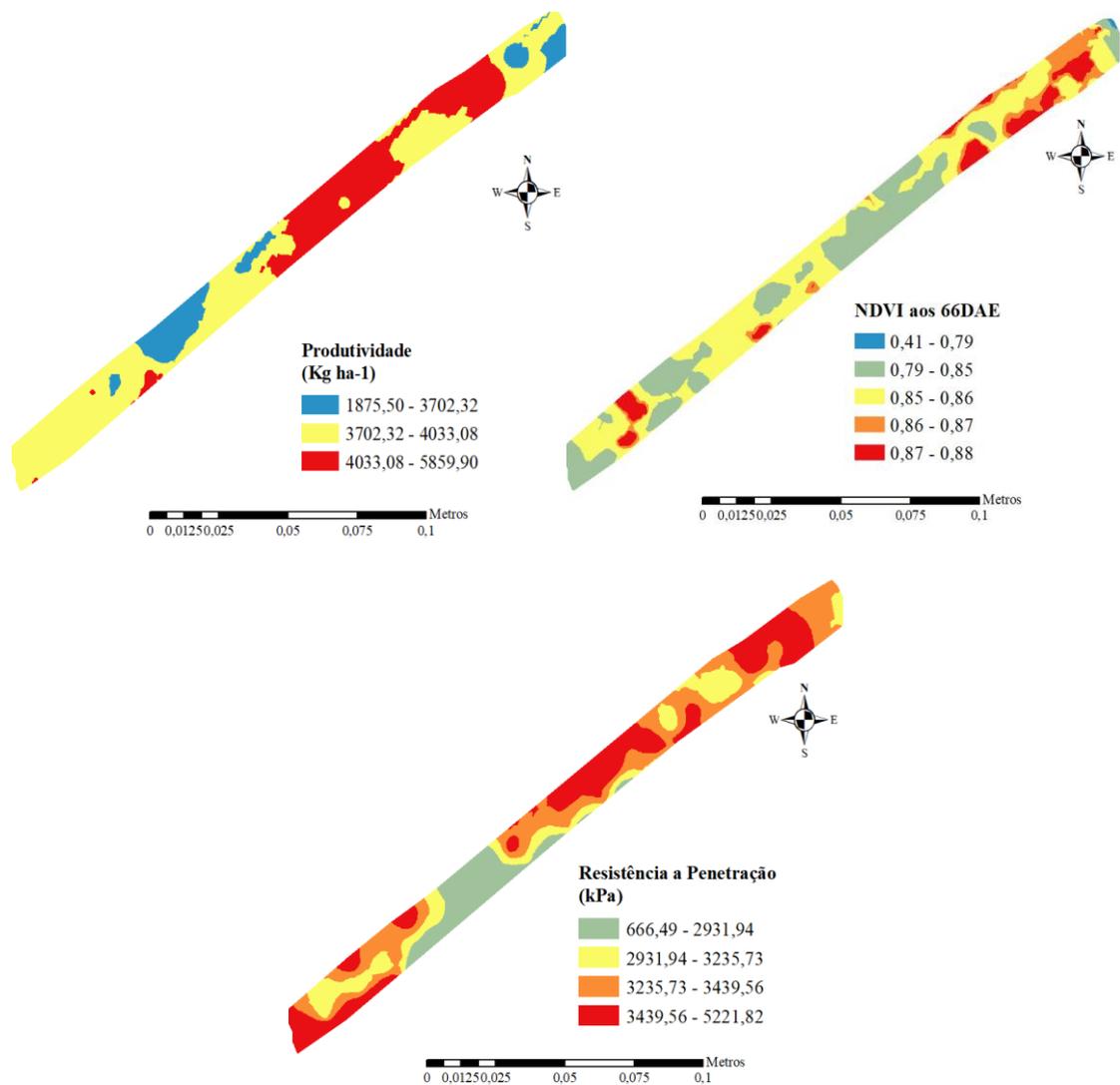


Fig. 9 Variação da produtividade, do índice de vegetação NDVI e da resistência mecânica do solo a penetração de acordo com a leitura realizada aos 66 DAE, com 3 e 5 classes respectivamente.

Aos 66 DAE a soja encontrava-se em estágio de desenvolvimento reprodutivo, o florescimento (R1 e R2). Para estabelecer a correlação das medidas de NDVI com a produtividade de grãos, as leituras do índice de vegetação devem ser realizadas com a cultura no estágio V9, estando ela em pleno desenvolvimento e sem a presença de flores que poderiam influenciar a resposta espectral do dossel. Enquanto que, nos estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura (R1 em diante), a soja apresenta saturação do NDVI, pois a reflectância é proveniente apenas das folhas superiores, em função da inserção das folhas que regula o grau de penetração da radiação no interior do dossel, o que gera limitações para a utilização do NDVI [30].

Houve influência negativa na produtividade de grãos (PROD) pela resistência mecânica do solo a penetração nas profundidades (RP3) de 0,4-0,6 m (Fig. 9), uma vez que a rede de correlações demonstra uma forte correlação linear inversa entre esses dois fatores. Essa influencia negativa podem ser atribuídas às pressões aplicadas sobre a superfície do solo que são distribuídas ao longo do perfil, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, de acordo com as características físicas do solo [46].

A compactação nas camadas superficial do solo na fase inicial do desenvolvimento das plantas prejudica o estabelecimento da cultura, visto que a emergência e o crescimento radicular estão associados às limitações físicas determinadas pelo solo [47]. No entanto, os efeitos da resistência mecânica do solo à penetração sobre o crescimento radicular e produtividade de grãos serão influenciados pelo tempo em que as plantas serão submetidas a esse estresse [48].

Mesmo com a influência negativa da compactação nas camadas de 0,4-0,6 m, a produtividade foi satisfatória, tendo em média de 65,7 sacas ha^{-1} . Considerando que as condições climáticas ideais podem ter minimizado os efeitos de um solo com tendência à compactação, o sistema radicular da cultura pode ter obtido água e nutrientes em quantidade satisfatória na camada superficial do solo, descompactada, proporcionando boas produtividades mesmo em locais com presença de camadas subsuperficiais compactadas [49].

A resistência mecânica do solo à penetração é uma propriedade física do solo que influencia o crescimento de raízes [50], além da redução da capacidade de penetração das raízes no solo e da disponibilidade de água e nutrientes às plantas, a compactação promove a alteração no equilíbrio da proporção de gases do solo [51]. Em consequência, o funcionamento bioquímico da planta é alterado, podendo reduzir a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea e, com isso, a produtividade da cultura [52]. A ampla faixa de grau

de compactação (75 a 89%) alcançada no Latossolo favorece a obtenção de diferentes respostas da soja aos níveis de compactação [53].

Alguns autores observaram em seu trabalho tendência à intensa degradação estrutural da camada subsuperficial do solo em áreas manejadas sob SPD, demonstraram que tanto as raízes do milho como as de braquiária, apresentaram desenvolvimento limitado nas camadas de 0,5-0,22 m e de 0,22-0,3 m de profundidade, indicando presença de fatores restritivos ao crescimento pleno das raízes devido à estrutura física do solo. Essa compactação faz-se perceptível por alterações de propriedades físicas do solo, alterações morfológicas de raízes de plantas e percepção, ocasional, de redução de produtividade das culturas [54].

A altura da planta medida aos 50 DAE teve correlação moderada positiva com a massa de cem grãos. Isso porque a taxa de crescimento dos grãos e da planta acumulando matéria seca e nutrientes nessa fase (R5) ainda é muito rápida, e a só diminui logo após o estágio R6, e nas sementes, logo após R6.5 [31].

Análise de componentes principais (ACP)

A rede de correlação mostrou que um grupo de propriedades do solo (CEa e RP) e fenológicas (ALT, MCG e IV) (Fig. 8) estão correlacionados entre si e com a produtividade. Portanto, para resumir a variabilidade observada entre cada grupo de atributos, a análise de componentes principais foi realizada (Fig. 10).

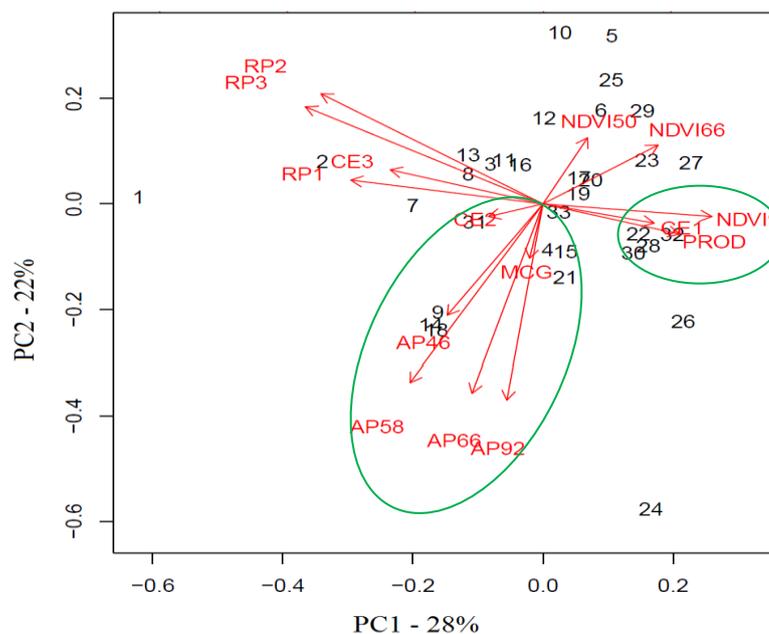


Fig. 10 Análise de componentes principais aplicados aos diferentes pontos amostrais avaliados sob agricultura de precisão e convencional.

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica multivariada de modelagem da estrutura de covariância, que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original. Essa técnica está associada à ideia de redução de massa de dados, com menor perda possível da informação. Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação [55].

O primeiro componente principal (PC1) reteve 28% da variabilidade total nos diferentes pontos amostrais avaliados sob agricultura de precisão e convencional, enquanto o segundo componente capturou 22% dessa variação. Estes dois componentes acumularam 50% da variabilidade total.

A CEa na profundidade de 0-0,2 m e NDVI observados aos 92 DAE foram as variáveis que apresentaram maior carga fatorial no componente principal 1 (Fig. 10), contribuindo com a maior parte da variabilidade total observada. Isso demonstra que as zonas de aplicações foram bem definidas com base na CEa nessa profundidade. O inverso ocorreu com a resistência mecânica do solo à penetração nas três profundidades avaliadas (0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) e com a CEa (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m).

A condutividade elétrica aparente do solo pode ser atribuída aos diferentes conteúdos de argila em cada área devido a sua eficiência em reter mais água, em relação ao silte e areia, sendo um dos fatores determinantes na capacidade do solo de conduzir corrente elétrica. Contudo, não é apenas a argila que influencia na CEa, outros fatores como salinidade, teor de água, textura e algumas propriedades químicas de interesse agrícola como a capacidade de troca catiônica (CTC) também influenciam a CEa do solo [4]. Quanto maior a CTC, maior é o número de cátions que pode ser retido na matéria orgânica, importante na fertilidade do solo [56]. E, As regiões com maiores valores de CEa correspondem a áreas de valores mais elevados dos parâmetros do solo (pH, Matéria Orgânica, P, CTC e Saturação por Base) [57].

A massa foliar refletida no índice de vegetação NDVI aos 92 DAE em plantas de soja foi um dos fatores que contribuiu para a produtividade dos grãos, uma vez que o acúmulo da mesma pode ser determinante para a máxima produtividade da cultura, podendo esta ser acumulada até o a fase final de enchimento dos grãos, pois o rendimento deste depende da taxa e da duração do tempo de acúmulo de matéria seca nas sementes [31]. O NDVI depende do contraste espectral entre vermelho e infravermelho próximo que é sensível ao teor de

clorofila das folhas e ao índice de área foliar [58], sendo estes valores de NDVI altamente correlacionados com a produção de biomassa [59].

Quanto à massa de cem grãos, este variou conforme o aumento da altura de plantas. Essa variação se deve a quantidade e ao tempo de acúmulo de matéria seca na planta e no grão. A taxa de incremento de matéria seca na planta de soja é pequena no início, porém aumenta gradativamente durante os estádios de desenvolvimento vegetativos, e logo após o início da formação de vagem (R3) e no período de enchimento de grãos (R5.5), esse incremento transloca progressivamente para as vagens e grãos em formação [31].

Para o componente principal 2 a variável que mais influenciou na variabilidade total foi a CEa nas profundidades de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Isso porque as aferições da CEa são influenciadas por uma série de fatores como, por exemplo, temperatura, teor de água, íons na solução do solo, textura, estrutura, quantidade de matéria orgânica do solo dentre outros fatores, não sendo possível estimar valores de atributos do solo sejam eles químicos ou físicos, utilizando medições de condutividade elétrica aparente do solo [60].

Resultado da pesquisa que mensurou a CEa na camada do subsolo (0,4-0,6 e 0,6-0,8 m) vão ao encontro com o presente trabalho, onde a variação da textura foi mais pronunciada no subsolo do que na camada superficial do solo. Isso foi possível através de medições CEa em profundidade para obter valores específicos das camadas, permitindo comparar a frações de argila, areia e materiais orgânicos, onde a argila e areia foram mais expressivas no subsolo [61].

Os pontos 22, 28, 30 e 32 ficaram mais próximos aos vetores de NDVI aos 92 DAE, CEa na camada de 0,0-0,2 m estando estes muito próximos do vetor de produtividade. Nestes foi realizado o manejo das sementes em taxa variada, isto é, agricultura de precisão, onde os valores correspondentes dos pontos com a quantidade de sementes é de 360 e 311 mil sementes por ha⁻¹.

Na produtividade essa variação não expressou muita diferença, uma vez que a cultura da soja é capaz de suportar grandes reduções de populações sem perdas significativas de produtividade. A diferença entre as populações de plantas de soja não interfere na qualidade fisiológica, no tamanho e na massa das sementes produzidas [12].

Conclusões

Todas as variáveis apresentaram dependência espacial, nenhuma com DE fraca, apenas moderada e forte.

As zonas de aplicações foram estabelecidas adequadamente com base na CEa na profundidade 0,0-0,2 m, devido ao teor de MO presente nessa camada, onde a CTC é mais expressiva.

A agricultura de precisão *versus* agricultura convencional influenciou nas variáveis NDVI aos 92 DAE, na CEa e RP avaliadas em diferentes profundidades (0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m).

A variação na população de sementes proporcionou igualdade na produtividade.

A agricultura de precisão foi similar à agricultura convencional.

Referências

1. Yorinori, J T. Soja: ferrugem asiática avança e exige cuidados mais intensos. **Correio**. 2007;1(1):3-6.
2. CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quinto levantamento, safra 2017/18. Brasília (MS). [Citado 2018 Fevereiro 8]. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_02_08_17_09_36_fevereiro_2018.pdf.
3. Velandia M, Rejesus RM, Bronson K, Segarra E. Economics and Marketing: Economics of Management Zone Delineation in Cotton Precision Agriculture. *The Journal of Cotton Science*. 2008;12(3):210–227.
4. Molin JP, Rabello LM. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*. 2011;31(1):90-101.
5. Adamchuk VI, Hummel JW, Morgan MT, Upadhyaya SK. On-the go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2004;44:71-91.

6. Veris Technologies [Internet]. Salina (KS): Overview Specifications. 67401. [Citado 2018 Março 03]. Disponível em: <http://www.veristech.com/the-sensors/p4000>.
7. Fraisse CW, Sudduth KA, Kitchen NR. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *American Society of Agricultural Engineers*. 2001;44(1):155-166.
8. Molin JP, Castro CN. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Scientia Agricola*. 2008;65(6):567-573.
9. Luchiari Junior A, Borghi E, Avanzi JC, Freitas AA, Bortolon L, Bortolon ESO, Ummus ME, Inamasu RY. Zonas de Manejo: teoria e prática. In: *Agricultura de precisão: Um novo olhar*. São Carlos-SP: Embrapa Instrumentação. 2011. p. 60-64.
10. Coelho JPC, Silva JRM. Inovação e tecnologia na formação agrícola: Agricultura de Precisão. Lisboa: Associação dos Jovens Produtores de Portugal – AJAP; 2009.
11. Knebel JL, Guimarães VF, Andreotti M, Stangarlin JR. Influência do espaçamento e população de plantas sobre doenças de final de ciclo e oídio e caracteres agronômicos em soja. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2006;28(3):385-392.
12. Vazquez GH, Carvalho NM, Borba MMZ. Redução na população de plantas sobre a produtividade e a qualidade fisiológica da semente de soja. *Revista Brasileira de Sementes*. 2008;30(2):01-011.
13. Embrapa. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013. 21th. ed., Londrina: Embrapa Soja, 2011.
14. Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3th ed. rev. ampl., Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2013.

15. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 2006;15(3):259-263.
16. Embrapa. Manual de métodos de análise de solo. 2th ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 1997.
17. Heiffig LS, Câmara GMS, Marques LA, Pedroso DB, Piedade SMS. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. *Bragantia*. 2006;65(2):285-295.
18. Trangmar BB, Yost RS, Wade MK, Uehara G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*. 1985;38:45-94.
19. Vieira SR. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2000.
20. Zimback CRL. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. 2001. 114f. Tese (Livre Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.
21. Bhering LL. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2017;17(2):187-190.
22. Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society America Journal*. 1994;58(5):1501-1511.
23. Machado LO, Lana AMQ, Lana RMQ, Guimarães EC, Ferreira CV. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. *Revista Brasileira Ciência Solo*. 2007;31(3):591-599.
24. Mendes AMS, Fontes RLF, Oliveira M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. *Ciência Agrônômica*. 2008;39(1):19-27.

25. Motomiya, A.V.A., Molin, J. P., Motomiya, W. R., Baio, F.H.R. Mapeamento do índice de vegetação da diferença normalizada em lavoura de algodão. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2012;42(1):112-118.
26. Vieira S. *Análise de Variância (ANOVA)*. São Paulo: Atlas; 2006.
27. Cargnelutti Filho A, Storck L. Estatística de avaliação da precisão experimental em ensaios de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília. 2007;42(1):17-24.
28. Dalmolin RSD, Gonçalves CN, Klamt E, Dick DP. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. *Ciência Rural*, 2005;35(2):481-489.
29. Mercante E, Lamparelli RAC, Uribe-Opazo MA, Rocha JV. Características espectrais da soja ao longo do ciclo vegetativo com imagens landsat 5/TM em área agrícola no Oeste do Paraná. *Engenharia Agrícola*. 2009;29(2):328-338.
30. Groff EC, Nanni MR, Povh FP, Cezar E. Características agronômicas associadas com índices de vegetação medidos por sensores ativos de dossel na cultura da soja. *Ciências Agrárias*. 2013;34(2):517-526.
31. Ritchie, SW. *Como a planta de soja se desenvolve*. Piracicaba: Potafos - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato; 2000.
32. Araújo EG, Corrêa AR, Lima DCOS, Prando EP, Sena, KN, Montanari, R, Silva RM. Análise espacial da condutividade elétrica e atributos físico-químicos de um Latossolo. *Revista Agrarian*. 2016;9(31):73-83.
33. Ciotta MN, Bayer C, Fontoura SMV, Ernani PR, Albuquerque JA. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. *Ciência Rural*. 2003;33(6):1161-1164.

34. Molin JP, Gimenez LM, Pauletti V, Schmidhalter U, Hammer, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. *Engenharia Agrícola*. 2005;25(2):420-426.
35. Baio FHR, Scarpin IM, Roque CG, Neves DC. Soil resistance to penetration in cotton rows and interrows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2017;21(6):433-439.
36. Silveira DC, Melo Filho JF, Sacramento JAAS, Silveira ECP. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência dos Solo*. 2010;34:659-667.
37. Machado PLOA, Bernardi ACC, Valencia LIO, Molin JP, Gimenez LM, Silva CA, Andrade AG, Madari BE, Meirelles MSP. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2006;41(6):1023-1031.
38. Betioli Júnior E, Moreira WH, Tormena CA, Ferreira CJB, Silva ÁP, Giarola NFB. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2012;36(3):971-982.
39. Mauad M, Silva TLB, Almeida Neto AI, Abreu VG. Influência da densidade de semeadura sobre características agrônômicas na cultura da soja. *Revista Agrarian*. 2010;3(9):175-181.
40. Monteiro ANL, Alves JMA, Matos WS, Silva MR, Silva DL, Barreto GF. Densidade de plantas e doses de NPK nos componentes de produção de soja-hortaliça na Savana de Roraima. *Revista Agro@mbiente On-line*. 2015;9(4):352-360.

41. Ferreira AS, Balbinot Junior AA, Werner F, Franchini JC, Zucareli, C. Soybean agronomic performance in response to seeding rate and phosphate and potassium fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande-PB. 2018;22(3):151-157.
42. Carvalho CGP, Arias CAA, Toledo JFF, Oliveira MF, Vello NA. Correlações e análise de trilha em linhagens de soja semeadas em diferentes épocas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2002;37(3):311-320.
43. Taware SP, Halvankar GB, Raut VM, Patil VP. Variability, correlation and path analysis in soybean hybrids. *Soybean Genetics Newsletter*. 1997;24:96-98.
44. Peixoto CP, Câmara GMS, Martins MC, Marchiori LFS, Guerzoni RA, Mattiazzi P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimentos de grãos. *Scientia Agrícola*. 2000;57(1):89-96.
45. Dancey C, Reidy J. *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed; 2006.
46. Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki LEAS, Horn R. *Mecânica do solo*. 1st ed. Lier QJ, editor. Física do solo (Viçosa): Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010.
47. Girardello VC, Amado TJC, Santi AL, Lanzasova ME, Tasca A. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. *Revista Scientia Agraria*. 2017;18(2):86-96.
48. Bengough AG, Bransby MF, Hans J, Mckenna SJ, Roberts TJ, Valentine, TA. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*. 2006;57(2):437-447.
49. Drescher MS, Eltz FLF, Denardin JE, Faganello A, Drescher, GL. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2012;36:1836-1844.

50. Tavares Filho J, Ribon AA. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. *Revista Brasileira de Ciência dos Solo*, 2008;32:487-494.
51. Batey T, Mckenzie DC. Soil compaction: Identification directly in the field. *Soil Use and Manage*. 2006;22(2):123-131.
52. Beutler AN, Centurion JF. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. *Scientia Agricola*. 2004;61(6):626-631.
53. Suzuki LEAS, Reichert JM, Reinert DJ, Lima CLR. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2007;42(8):1159-1167.
54. Denardin JE, Kochhann RA, Santi A, Faganello A, Sattler A. Efeito da consorciação milho-braquiária (*Brachiaria brizantha*) na mitigação da compactação do solo. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*; 2008.
55. Hongyu K, Sandanielo VLM, Oliveira Junior, GJ. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação Principal Component Analysis: theory, interpretations and applications. *E&S - Engineering and Science*. 2016;5(1):83-90.
56. Pavinato PS, Merlin A, Rosolem CAR. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. *Revista Brasileira de Ciência dos Solos*. 2009;33:1031-1040.
57. Bernardi ACC, Grego CR, Andrade RG, Rabello LM, Inamasu RY. Spatial variability of vegetation index and soil properties in an integrated crop-livestock system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2017;21(8):513-518.
58. Numata I, Roberts DA, Chadwick OA, Schimel J, Sampaio FR, Leonidas FC, Soares JV. Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 2007;1(109):314-327.

59. Silva Júnior MC, Pinto FAC, Queiroz DM, Vieira LB, Resende RC. Using an aerial system of remote sensing to detect different nutritional status in *Brachiaria decumbens*. *Engenharia Agrícola*. 2013;34(5):1049-1062.
60. Bottega EL, Queiroz DM, Santos NT, Pinto FAC, Souza CMA. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. *Comunicata Scientiae*. 2015;6(2):134-142.
61. Piikki K, Wetterlind J, Soderstrom M, Stenberg B. Three-dimensional digital soil mapping of agricultural fields by integration of multiple proximal sensor data obtained from different sensing methods. *Precision Agriculture*. 2015;16:29–45.