

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
AGRICULTURA E AMBIENTE**

Júnior Melo Damian

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)
PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E MONITORAMENTO
DA VARIABILIDADE DA SUCESSÃO AVEIA PRETA/SOJA**

**Frederico Westphalen, RS
2017**

Júnior Melo Damian

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA
DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E MONITORAMENTO DA
VARIABILIDADE DA SUCESSÃO AVEIA PRETA/SOJA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luis Santi

Frederico Westphalen, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Damian, Júnior Melo

Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de zonas de manejo e monitoramento da variabilidade da sucessão aveia preta/soja / Júnior Melo Damian.- 2017.

101 f.; 30 cm

Orientador: Antônio Luis Santi

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2017

1. Agricultura de precisão 2. Culturas de cobertura
3. Rendimento de grãos 4. Imagens de satélite 5.
GreenSeeker. Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas
I. Santi, Antônio Luis II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Júnior Melo Damian. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua do Comércio, 1380, Centro. Taquaruçu do Sul, RS, CEP 98410-000.

Fone: (0xx55) 9969 0524; Endereço eletrônico: juniormelodamian@hotmail.com

Júnior Melo Damian

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA
DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E MONITORAMENTO DA
VARIABILIDADE DA SUCESSÃO AVEIA PRETA/SOJA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovado em 18 de janeiro de 2017:

Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Christian Bredemeier, Dr. (UFRGS)

Fábio Marcelo Breunig, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

Aos meus pais, Vitalina de Melo Damian e Pedro Roberto Damian, a todos os meus familiares e amigos, que desde o início dessa caminhada, pelo incentivo, carinho e confiança.

A Denise, pelo amor, pelo carinho, amizade, e por sempre estar ao meu lado...

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

Agradecer a divina santidade, nosso senhor Deus, pela vida e por sempre estar ao meu lado.

A minha luz e fonte de inspiração, meus pais Vitalina de Melo Damian e Pedro Roberto Damian.

Saudar minha Santa Terra missioneira, minha São Luiz Gonzaga, lugar aonde aprendi, na rotina campesina, a respeitar a natureza sem precisar cursar a faculdade.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela oportunidade de poder usufruir de ensino gratuito e de excelente qualidade. Agradecer aos professores desta instituição, pelas ótimas disciplinas cursadas e por serem parte ativa na construção do conhecimento profissional, ético e pessoal durante todo o período de graduação e mestrado.

À minha namorada Denise Parizotto, por todo o apoio e carinho que me foi dado quando nos momentos difíceis precisei. Também pela compreensão pelos momentos em que não pude me fazer presente ao seu lado e por todo o respeito e admiração mútuo que faz nosso relacionamento ser único e especial para mim.

Ao Prof. Dr. e orientador Antônio Luis Santi, primeiramente pela amizade, pois com a mesma podemos chegar até aqui com a realização deste trabalho e, essa sempre permanecerá. Agradeço por acreditar na minha capacidade e pela essência humana depositada em cada trabalho de pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de mestrado e também pela oportunidade de cursar a graduação sanduíche pelo programa Ciência sem Fronteiras na Itália.

Aos colegas de apartamento Felipe Bonini da Luz, Diego Henrique Simon, Rudinei de Marco e Ezequiel Fornari pelos bons momentos vividos e que jamais serão esquecidos ao longo da graduação e mestrado.

Aos amigos Diego Henrique Simon e Felipe Bonini da Luz, pela família que construímos e que podemos nos considerar irmãos. Também aos amigos Cicero Ortigara, André Luis Vian e Lucas Aquino Alves pelas palavras de apoio, boas risadas nos momentos de descontração.

Ao professor Clovis Orlando Da Ros, pela ajuda com as análises laboratoriais e por acreditar na credibilidade do meu trabalho de mestrado.

Aos amigos do Ciência sem Fronteiras na Itália, Flavia Mayumi Nakase, Luan Cutti, Vildomar Brun Filho, Francis Fonseca Oliveira, Cristiano Rezende Gerolin, Andressa Caroline Loebens Diel, Samuel Domingos da Silva, Helter Carlos Pereira, Gustavo Buzaglo, Graziela Grassi Gelain, Ariel de Souza Graça, Fabíola Fernandes, Clemilson Wagner de Sousa Martins e Osvaldo Pereira da Silva Neto pela amizade, companheirismo e pelas alegrias compartilhadas durante o período de intercâmbio na Itália, sem vocês esse ano não seria o mesmo e tenho certeza jamais será esquecido.

Ao grupo LapSul, representados por Alencar Zachi da Fonseca, Romano Augusto Martini Dal Bello, Fagner Augusto Rontani, Felipe Arthur Baron, Jonas Willmbrink, Diandra Pinto Della Flora, Carolina Trentin, Renan Tonin Martini, Dejales Fioresi, Emerson Brignoni, Valéria Testa, Fernanda Marcolan Souza, Leila Daiane Almeida dos Santos, Manúcia Piaia e Osmar Henrique de Castro Pias pelo exemplo de trabalho em grupo, pela coragem e dedicação singular e por mostrarem que mesmo sem recursos financeiros pode-se realizar trabalhos de qualidade. Um especial agradecimento aos lapianos Alencar Zachi da Fonseca, Romano Augusto Martini Dal Bello, Fagner Augusto Rontani, e Ezequiel Fornari por estarem sempre dispostos a ajudar seja para o que e quem for.

Ao grupo PET-Ciências Agrárias, em nome do tutor (eterno) Vanderlei Rodrigues da Sila, pela ótimas experiências vivenciadas e pelos amigos, em especial à Diego H. Simon, Felipe Bonini da Luz, Hazael Soranzo de Almeida, Cicero Ortigara, Carlos Alberto Gonsiorkiewicz Rigon, Juliano Berghetti, Juliete Maria Frighetto, Gracieli Manfrin da Silva, Mateus Bortoluzi Bisognin, Tiago Vinícios Strojaki, Laila Mayara Drebes, pelas amizades que fizemos, pelas alegrias que compartilhamos e pelos conhecimentos que juntos construímos.

"... E se não houver campo aberto quando eu me for, um galpão acolhedor de santa fé bem coberto, um pingo pastando perto e um cusco companheiro, eu juro pelo meu povo, nem todo céu me segura, retorno a velha planura para ser gaúcho de novo."

Jayme Caetano Braun

RESUMO

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO E MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE DA SUCESSÃO AVEIA PRETA/SOJA

AUTOR: Júnior Melo Damian

ORIENTADOR: Antônio Luis Santi

O Sistema Plantio Direto (SPD) foi uma das principais inovações na agricultura brasileira, contudo ainda há discussões sobre como alcançar e manter sua qualidade e sustentabilidade. A gestão de áreas sob SPD por meio de zonas de manejo, apresenta grande potencial para essa finalidade, pois integra diferentes variáveis afim de facilitar e incrementar a gestão tecnificada e informatizada das práticas agrícolas, e em consequência a redução de potenciais poluidores no ambiente. Entre as principais variáveis utilizadas para delimitar zonas de manejo estão os atributos químicos, mapas de rendimento e recentemente o índice NDVI. Nesse sentido, com o artigo I objetivou-se delimitar zonas de manejo por meio de mapas de rendimento e NDVI oriundos de imagens de satélite em séries históricas. Para isso, em uma área de 118 ha, selecionou-se três mapas de rendimento de diferentes culturas compreendidas entre os anos de 2010 a 2015 e para cada mapa de rendimento buscou-se selecionar as imagens satélite oriundas série Landsat que compreendessem uma data dentro do ciclo da cultura em questão a partir das quais procedeu-se o cálculo do NDVI e ainda com o intuito de verificar a estabilidade do NDVI gerado em diferentes ciclos de cultivo, foram selecionadas outras quatro imagens de satélites referentes a quatro cultivos, segundo o histórico de cultivo da área de estudo, compreendidos entre os anos de 2007 a 2013. Já no artigo II, o objetivo foi verificar a variabilidade causada pela cultura de cobertura de inverno na cultura de verão e se o índice de NDVI realizado “por terra” e com um RPAS é capaz de evidenciar essa variabilidade na cultura de verão. Em uma área 73,96 ha, aplicou-se uma malha amostral de 70,71 x 70,71 m (0,5 ha), onde realizou-se a amostragem de solo para a análise química e as avaliações de matéria seca e os nutrientes acumulados na cultura de cobertura inverno da aveia preta onde sobre esta, foi semeada no verão a cultura da soja, na qual nos estágios R5 e R5.5 foram realizadas avaliações com um sensor portátil “por terra” e com um RPAS para a obtenção do índice de NDVI e por final determinou-se o rendimento de grãos da soja, bem como, a população final de plantas. Com os resultados, constatou-se que O NDVI foi um bom parâmetro para delimitar duas zonas de manejo de alto e baixo potencial (artigo I) e que a matéria seca e os nutrientes acumulados na cultura de inverno interferem o rendimento da cultura de verão, sendo que o índice de NDVI realizado “por terra” ou com um RPAS foi eficaz em expressar essa variabilidade (artigo II).

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Culturas de cobertura. Rendimento de grãos. Imagens de satélite. GreenSeeker. Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas.

ABSTRACT

NORMALIZED DIFFERENTIAL VEGETATION INDEX (NDVI) FOR THE DEFINITION OF MANAGEMENT ZONE AND MONITORING OF VARIABILITY OF SUCCESSION BLACK OATS / SOYBEAN

AUTHOR: JÚNIOR MELO DAMIAN
ADVISOR: ANTÔNIO LUIS SANTI

The no-tillage system (SPD) was one of the main innovations in Brazilian agriculture, but there are still discussions about how to achieve and maintain its quality and sustainability. The management of SPD areas through management zones presents great potential for this purpose, since it integrates different variables in order to facilitate and increase the technical and computerized management of agricultural practices and consequently the reduction of polluting potencies in environments. Among the main variables used to delimit management zones are the chemical attributes, yield maps and recently the NDVI index. In this sense, with Article I, the objective was to delimit management zones through yield maps and NDVIs derived from satellite images in historical series. To do this, in an area of 118 ha, three yield maps of different cultures between the years of 2010 to 2015 were selected and for each yield map we searched for the images from the Landsat 5 and 8 satellite that included a date in of the cycle of the crop in question from which the NDVI was calculated and also with the intention of verifying the stability of the NDVI generated in different crop cycles, four other satellite images were selected for four crops according to the historical of the study area, between the years 2007 and 2013. In article II, the objective was to verify the variability caused by the winter cover crop in the summer crop and if the NDVI index performed by land and with a RPAS is able to evidence this variability in the summer crop. In an area 73.96 there was applied a sampling grid of 70.71 x 70.71 m (0.5 ha), where soil sampling for chemical analysis and dry matter nutrients accumulated in the winter cover crop of black oats where soybean was sown in the summer, in which in the R5 and R5.5 stages evaluations were carried out with a portable sensor "by land" and with a RPAS for obtaining of the NDVI index and finally the grain yield of the soybean was determined, as well as the final population of plants. With the results, NDVI from satellite images can replace and/or compose the yield maps (article I) and that the dry mass and accumulated nutrients in the winter crop interfere with the yield of the summer crop and the NDVI index performed by land or with a RPAS was effective in expressing this variability (article II).

Key words: Precision agriculture. Cover crops. Grain yield. Satellite images. GreenSeeker. Remotely piloted aircraft systems.

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO

Tabela 1 – Tabela de metanálise sobre a evolução da utilização das técnicas de agricultura de precisão	16
---	----

ARTIGO I

Tabela 1 – Histórico de cultivos, práticas de adubações na área estudada entre os anos de 2008 a 2014	23
Tabela 2 – Datas dos eventos de colheitas e de aquisição de imagens de satélites utilizadas para a confecção dos mapas de rendimento e do NDVI obtidos segundo os mapas de rendimento (NDVI com referência) e do NDVI obtido em outras culturas (NDVI sem referência)	26
Tabela 3 – Estatística descritiva dos mapas de rendimento e dos valores de NDVI obtidos segundo os mapas de rendimento (NDVI com referência) e de NDVI obtido em outras culturas (NDVI sem referência)	31
Tabela 4 – Matriz de correlação de Spearman a 1% de probabilidade de erro ($p \leq 0,01$) entre os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência ..	35
Tabela 5 – Equação de Stepwise para estimativa dos componentes de cada variável dependente referentes dos mapas de rendimento NDVI com referência e NDVI sem referência	36
Tabela 6 – Análise geoestatística para os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência	38
Tabela 7 – Comparação de medias dos diferentes cultivos referentes aos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência nas três zonas de manejo	51
Tabela 8 – Comparação de medias dos diferentes cultivos nas três zonas de manejo confeccionadas a partir da interpolação com algoritmo fuzzy c-means com os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência.....	53

ARTIGO II

Tabela 1 – Histórico de cultivos e do manejo de correções e adubações na área estudada entre os anos de 2008 a 2015	63
Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados na profundidade de 0-0,10 m	71
Tabela 3 – Estatística descritiva da composição química da matéria seca da cultura da aveia preta e do rendimento e população de plantas da cultura da soja	73
Tabela 4 – Estatística descritiva do NDVI gerado a partir de leituras “por terra” com o Green Seeker e com o RPAS avaliados nos estagio R5 e R5.5 na cultura da soja	74

Tabela 5 – Matriz de correlação de Spearman entre as propriedades químicas do solo, da cultura da soja e da aveia preta e das leituras leituras “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS avaliados nos estagio R5 e R5.5 na cultura da soja	78
Tabela 6 – Equação de Stepwise para estimativa dos componentes da variável dependente rendimento de grãos da cultura da soja.....	79
Tabela 7 – Análise de trilha com os efeitos diretos e indiretos das variáveis selecionadas com equação de Stepwise.....	80
Tabela 8 – Análise geoestatística das variáveis selecionadas com equação de Stepwise e para rendimento de grãos da cultura da soja	82
Tabela 9 – Análise de componentes principais para as variáveis explicativas do rendimento de grãos da soja	85
Tabela 10 – Análise geoestatística para dos componentes principais 1, 2 e 3	85
Tabela 11 – Comparação de medias das variáveis MS, NGS5, NR5, MgA, NA, MO e Ren nas quatro zonas de manejo confeccionadas a partir do método dos componentes principais	88
Tabela 12 – Comparação de medias das variáveis das MS, NGS5, NR5, MgA, NA, MO e Ren nas quatro zonas de manejo confeccionadas a partir do programa <i>Management Zone Analyst (MZA)</i>	91

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

Figura 1 – Localização geográfica da área experimental utilizada no estudo	22
Figura 2 – Temperatura diária mínima (•••) e máxima (—) e precipitação diária (), para os mapas de rendimento de Aveia Branca/2010 (a); Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c).	24
Figura 3 – Temperatura diária mínima (•••) e máxima (—) e precipitação diária (), para as culturas da de Soja/2007 (a); Milho/2008 (b); Soja/2009 (c) e Soja/2013 ...	26
Figura 4 – Representação do transformação dos valores de cada pixel (a) em um ponto centroide nos mesmos (b).....	27
Figura 5 – Esquema da disposição espacial da malha de 30 x 30 m utilizada para a sobreposição dos mapas de rendimento e NDVI	28
Figura 6 – Box-plot dos diferentes cultivos para os mapas de rendimento (a), NDVI com referência (b) e NDVI sem referência (c). Linha horizontal dentro de cada caixa indica a mediana; os limites superior e inferior representam os 75° e 25° percentis; as barras verticais acima e abaixo da caixa representam o 90° e o 10° percentis e os círculos sólidos acima e abaixo das barras verticais indicam os valores fora dos limites de confiança.....	33
Figura 7 – Distribuição espacial (kg/ha) dos mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c).....	41
Figura 8 – Distribuição espacial do NDVI com referência da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b), Soja/2014 (c) e da média dos três cultivos (d).....	42
Figura 9 – Distribuição espacial do NDVI sem referência da Milho/2008 (a), Soja/2009 (b), Soja/2013 (c) e da média dos três cultivos (d).....	43
Figura 10 – Índice de perfomance <i>fuzzi</i> (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para os mapas de rendimento.....	44
Figura 11 – Índice de perfomance <i>fuzzi</i> (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para o NDVI com referência	45
Figura 12 – Índice de perfomance <i>fuzzi</i> (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para o NDVI sem referência.....	46
Figura 13 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo <i>fuzzy</i> c-means para os mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c).....	48
Figura 14 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo <i>fuzzy</i> c-means para o NDVI com referência da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c) e da média dos três cultivos (d)	49
Figura 15 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo <i>fuzzy</i> c-means para o NDVI sem referência do Milho/2008 (a), Soja/2009 (b), Soja/2013 (c) e da média dos três cultivos (d)	50

Figura 16 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo fuzzy c-means para os mapas de rendimento (a), NDVI com referência (b) e NDVI sem referência (c).....	52
--	----

ARTIGO II

Figura 1 – Localização geográfica da área experimentais utilizadas no estudo	62
Figura 2 – Distribuição dos pontos utilizados para as avaliações dos atributos de solo e plantas na área segundo a malha de 70,71 x 70,71 m	64
Figura 3 – Temperatura diária mínima (●) e máxima (➔) e precipitação diária (█), durante o ciclo da cultura da aveia preta (a) e da soja (b).....	66
Figura 4 – Modelo de PRAS (a) e câmara utilizada (b) durante as avaliações realizadas nos estágio R5 (c) e R5.5 (d) da cultura da soja.....	67
Figura 5 – Mapas de distribuição espacial para as variáveis MS (a), NA (b), MO (c), NR5 (d), NGS5 (e) MgA(f) e Ren (g)	83
Figura 6 – Distribuição dos valores de MS (kg ha ⁻¹) e Ren (kg ha ⁻¹) nos 147 pontos de amostragem na área de estudo.....	84
Figura 7 – Mapas de distribuição espacial da componentes principais 1 (a), 2 (b) e 3 (c)...	86
Figura 8 – Índice de perfomance <i>fuzzi</i> (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado para os componentes principais.....	87
Figura 9 – Mapa de zonas de manejo definidas a partir do método dos componentes principais	87
Figura 10 – Índice de perfomance <i>fuzzi</i> (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren.....	89
Figura 11 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo <i>fuzzy</i> c-means para para as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	HIPÓTESE	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	ARTIGO I – DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO A PARTIR DE MAPAS DE RENDIMENTO E NDVI DE IMAGENS DE SATÉLITE: UM ESTUDO DE CASO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB CLIMA SUBTROPICAL NO SUL DO BRASIL	18
2.1	RESUMO.....	18
2.2	ABSTRACT	19
2.3	INTRODUÇÃO.....	19
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	21
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
2.6	CONCLUSÕES.....	54
2.7	AGRADECIMENTOS	54
2.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
3	ARTIGO II – VARIABILIDADE CAUSADA PELA CULTURA DE COBERTURA DE INVERNO NA CULTURA DE VERÃO EM SUCESSÃO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO	59
3.1	RESUMO.....	59
3.2	ABSTRACT	60
3.3	INTRODUÇÃO.....	60
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	62
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
3.6	CONCLUSÕES.....	92
3.7	AGRADECIMENTOS	92
3.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
4	DISCUSSÃO	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

O sistema agrícola brasileiro pode ser definido pelas características referentes a produção, comercialização e exportação. Porém nas últimas décadas, o conceito de preservação ambiental, aliado ao aumento da produção está embutido em todos esses processos e representa um desafio atual. Nesse quesito, o Sistema Plantio Direto (SPD) representou e ainda representa uma tecnologia que, quando bem manejada, pode contribuir para sanar esses problemas.

Nos últimos 50 anos a quantidade de terra agricultável per capita diminuiu cerca de 50% no mundo (GLOBAL SOIL FORUM, 2016). De acordo com a FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION), 33% das terras cultivadas têm alto ou médio grau de degradação devido à poluição, acidificação química dos solos, salinização, compactação, erosão (FAO, 2015), sendo que, os dois últimos fatores citados são os principais problemas no SPD no Brasil.

No Brasil, o clima predominante é o tropical (ALVARES et al., 2013), que caracteriza-se por apresentar no período das águas, precipitações concentradas, ou seja, um alto volume de água em um curto espaço de tempo e nesse aspecto, o solo necessita apresentar uma boa estrutura para que durante a precipitação, a água infiltre e não ocorra o escoamento superficial que potencializa a ocorrência de erosão, e além disso, para que posteriormente a precipitação a água permaneça no mesmo (AHMADI et al., 2011). Com isso, o SPD torna-se uma prática essencial que visa a evitar e reduzir esses impactos, atuando como o principal amenizante da degradação do solo, pois proporciona que o solo esteja sempre coberto, onde diferentes culturas que estão em pleno desenvolvimento ou como resíduos culturais atuam como uma barreira mecânica à energia cinética da água e posteriormente, após sua decomposição, interagem com o solo na forma de matéria orgânica, o que entre outros benefícios, auxilia na estabilidade dos agregados influenciando na qualidade estrutural e no movimento de água (DIEKOW et al., 2005). Além desses benefícios, o SPD, por meio da matéria orgânica acumulada no solo, aumenta a fixação de carbono no solo, e diminui a concentração de CO₂ na atmosfera e ainda é responsável por aumentar a biodiversidade e a população de espécies na fauna do solo (SANTOS et al., 2008; CUNHA et al., 2012).

Contudo, mesmo o SPD sendo uma prática valiosa para a conservação do solo, ainda são escassas as informações quanto à forma correta de manejá-lo. Esta constatação baseia-se principalmente nas incertezas quanto ao real efeito que causam diferentes tipos de plantas de cobertura no solo, o que sugere a necessidade de um monitoramento mais criterioso a campo.

A necessidade de monitoramento do SPD vem ao encontro as ferramentas da Agricultura de Precisão (AP). Segundo Valente et al. (2011), a AP surge como um novo conceito de manejo, em outras palavras, pode ser considerada como uma estratégia de gestão que utiliza a tecnologia da informação com o objetivo de elevar a produtividade e a sua qualidade.

Desde seu início, a AP tem evoluído constantemente, como mostra a Tabela 1, em que muitas tem sido as iniciativas que visam à disponibilização de imagens de sensores orbitais capazes de permitir inferências confiáveis e em tempo real sobre a dinâmica espaço-temporal de vegetação, como é o caso do índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (FREITAS et al., 2011). De acordo com Risso et al. (2012), esse fato denota da dificuldade em monitorar sistemas dinâmicos, como nesse caso a agricultura, que em sua maioria apresenta culturas de ciclo anual e, por ser de ocorrência de escalas espaciais e temporais, requer um aporte científico maior.

Tabela 1 – Tabela de metanálise sobre a evolução da utilização das técnicas de agricultura de precisão

Autor\Ano	Título	Tema\Assunto
Nelson e Phelps (1966)	Investment in humans, technological diffusion, and economic growth	Conceitos iniciais sobre de AP com o uso de tecnologias na agricultura
Lin (1990)	Education and Innovation Adoption in Agriculture: Evidence from Hybrid Rice in China.	Utilização de malhas amostrais e distribuição de fertilizantes a taxa variada.
Dwyer et al. (1991)	A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn.	Pesquisas iniciais sobre sensores ópticos portáteis baseado no teor de clorofila da planta.
Roberts et al. (1999)	Economic evaluation of variable rate nitrogen application on cotton.	Implicações sobre a variabilidade do N na lavoura.
Batte e Arnhol (2003)	Precision farming adoption and use in Ohio: case studies of six leading-edge adopters.	Análise sobre crescimento da utilização da AP.
Ramos et al. (2009)	Reflexões acerca das nanotecnologias e as novas densidades técnicas-científicas- informacionais na agricultura	Pesquisa de caso sobre o impacto da nanotecnologia (manipulação da matéria ao nível atômico) na AP.
Colomina e Molina (2014)	Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review	Estudo sobre as potencialidades do uso dos RPAS em diversos setores, inclusive na agricultura.

Os recentes avanços da AP apontam para a crescente utilização de imagens de satélites, bem como, a utilização dos chamados Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), que estão se destacando como uma tecnologia emergente na AP, os quais possibilitam a obtenção de informações bem como a tomada de decisão em tempo real (COLOMINA; MOLINA, 2014). Os RPAS são conhecidos por vários nomes e siglas diferentes, tais como " robô aéreo " ou simplesmente "drone", ou "zangão", sendo esses os mais populares, pelo fato do ruído causado durante o vôo, assemelhando-se ao uma abelha.

Portanto, como já discutido, o SPD oferece inúmeros benefícios, porém ainda é precariamente manejado e se desconhece sobre às culturas de cobertura utilizadas nesse sistema, o que remete diretamente sobre a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema agrícola. Com isso, o SPD deve ser monitorado, principalmente quanto as culturas de cobertura utilizadas, pois estas são responsáveis pela qualidade do mesmo e nesse sentido a utilização de ferramentas e tecnologias como é o caso do uso de zonas de manejo e índices de vegetação realizados com imagens de satélites, sensores portáteis ou, mais recentemente, pelos RPAS representam uma oportuna alternativa para essa finalidade.

1.1 HIPÓTESE

Ainda são desconhecidos os efeitos da variabilidade espacial das culturas de coberturas de inverno sobre a variabilidade espacial na cultura de verão em SPD, sendo que, ferramentas como zonas de manejo e NDVI oriundos de imagens de satélite, sensores portáteis e RPAS, podem auxiliar no monitoramento e em planos de estratégias de gestão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Procurar verificar os efeitos da variabilidade na cultura de inverno da aveia preta sob a variabilidade na cultura da soja em sucessão, utilizando zonas de manejo e NDVI oriundos de imagens de satélite, sensores portáteis e RPAS.

1.2.2 Objetivos Específicos

Mensurar o potencial do índice NDVI como ferramenta para delimitar zonas de manejo.

Caracterizar a similaridade entre zonas de manejo delimitadas com o índice NDVI oriundo de imagens de satélites e as zonas de manejo delimitadas com mapas de rendimento.

Avaliar os efeitos da variabilidade da massa seca da cultura da aveia preta no rendimento de grãos da cultura da soja em sucessão.

Avaliar os efeitos da variabilidade da ciclagem de nutrientes da cultura da aveia preta no rendimento de grãos da cultura da soja cultivada em sucessão.

Delimitar zonas de manejo para intervenções a curto, médio e longo prazo para a gestão de planos de rotação e adubação.

2 ARTIGO I – DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO A PARTIR DE MAPAS DE RENDIMENTO E NDVI DE IMAGENS DE SATÉLITE: UM ESTUDO DE CASO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB CLIMA SUBTROPICAL NO SUL DO BRASIL

2.1 RESUMO

Este estudo teve como objetivo caracterizar as zonas de manejo obtidas a partir de mapas de rendimento e NDVI obtido a partir de imagens de satélite em uma área de Latossolo Vermelho sob clima subtropical no sul do Brasil. Para tanto, o estudo foi conduzido em uma área de Latossolo Vermelho de 117,17 ha, localizada no município de Boa Vista das Missões – RS, Brasil. Selecionou-se três mapas de rendimento de diferentes culturas compreendidas entre os anos de 2010 a 2015. Para cada mapa de rendimento buscou-se selecionar imagens de satélite oriundas série Landsat que compreendessem uma data dentro do ciclo da cultura em questão a partir das quais procedeu-se o cálculo do NDVI. Com o intuito de verificar a estabilidade do NDVI gerado em diferentes ciclos de cultivo, foram selecionadas outras quatro imagens de satélites referentes a quatro cultivos, segundo o histórico de cultivo da área de estudo, compreendidos entre os anos de 2007 a 2013. As variáveis foram submetidas a análises de estatística descritiva, matriz de correlação de Spearman, regressão múltipla de Stepwise e geoestatística. As zonas de manejo foram delimitadas com o algoritmo *fuzzy c-means*. Para testar a acurácia do software em distinguir as zonas de manejo, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Com base nos resultados constatou-se que os mapas de rendimento apresentaram correlação de baixa a média com o NDVI relativo a cada cultivo e com o NDVI de diferentes cultivos. O algoritmo *fuzzy c-means* foi eficiente em delinear as zonas de manejo a partir dos mapas de rendimento e com NDVI relativo a cada mapa de rendimento e de NDVI de diferentes cultivos. O NDVI foi um bom parâmetro para delimitar duas zonas de manejo de alto e baixo potencial.

PALAVRAS-CHAVE: Fuzzy c-means agrupamento. Landsat. Variabilidade espacial. Análise multi-temporal.

2.2 ABSTRACT

This study was aimed at characterizing the management zones obtained from yield maps and NDVI obtained from satellite images in a Oxisol area in subtropical climate in southern Brazil. Therefore, the study was conducted in a Oxisol area of 117.17 ha, located in Boa Vista das Missões – RS, Brazil. Was selected three yield maps of different cultures between the years 2010-2015. For each yield map was sought to select satellite images derived from Landsat series been within a date within the crop cycle in question from which proceeded to the calculation of the NDVI. With the intention of verify the stability of the NDVI generated in different cropping cycles were selected four other satellite images from four crops according to cultivation history of the study area comprised between the years 2007 to 2013. The variables were subjected to analysis of descriptive statistics, Spearman correlation matrix, Stepwise multiple regression and geostatistical. The management zones were delimited with the fuzzy algorithm c-means. In order to test the accuracy of the software to distinguish the management zones, was applied the Tukey test at 5% probability of error. Based on the results it was observed that the yield maps presented correlation with the NDVI for each crop and the NDVI of different crops. The fuzzy algorithm c-means, was efficient in delineating the management zones from yield maps and NDVI for each map yield and NDVI of different crops. The NDVI was a good parameter to delimit two management zones of high and low potential.

KEYWORDS: Fuzzy c-means clustering. Landsat. Spatial variability. Multi-temporal analysis.

2.3 INTRODUÇÃO

Desde seu surgimento no início de 1990 a agricultura de precisão (AP) vem passando por um processo de renovação no que tange a compreensão do sistema solo-planta-atmosfera, em que várias ferramentas e tecnologias foram e estão sendo utilizadas para esta finalidade (LEE e EHSANI, 2015; SRBINOVSKA et al., 2015). Não obstante disso, na linha evolutiva da AP, a conceituação sobre essa ferramenta também foi aprimorada, passando adquirir além da importância econômica, mediante a racionalização de insumos, também a relevância a nível ambiental (SHAW et al., 2016).

Proporcionar que um sistema agrícola seja rentável, economicamente viável e, sem causar danos ao meio ambiente é um dos principais desafios na atualidade e nesse quesito Bullock et al. (2007) indicam que a AP é considerada a abordagem mais viável para alcançar esse objetivo. Nesse enfoque, para atingir essa meta em uma área agrícola, demanda-se de informações que representem o sistema produtivo, desde o solo, planta e o ambiente. Uma técnica que gera parâmetros que interagem com todos esses fatores são as denominadas zonas de manejo. Para delimitar as zonas de manejo, são utilizados uma gama de fatores que podem ser referentes ao solo como atributos químicos e físicos (SANTI et al., 2016; DAMIAN et al., 2016), componentes topográficos (FRAISSE et al., 2001, FRIDGEN et al., 2004), índices de vegetação (ZHANG et al., 2010; CHANG et al., 2014) e, informações sobre parâmetros intrínsecos das culturas (EL NAHRY et al., 2011; TAGARAKIS et al., 2013). Entre os parâmetros citados, a mensuração da variabilidade do rendimento e de índices de vegetação, demonstram ser essenciais em um grande número de estudos que buscam delimitar zonas de manejo.

De acordo com Zhang et al. (2010) a variabilidade espacial do rendimento além de refletir o potencial do solo em oferecer condições adequadas para a máxima expressão do rendimento, também fornece uma indicação do nível de nutrientes para a cultura sucessora de acordo com os resíduos orgânicos gerados. Além disso, a variabilidade espacial do rendimento possibilita a aplicação a taxa variável de nutrientes para a próxima cultura ou safra (JOHNSON et al., 2003), assim denominada, taxa variada de fertilizantes segundo a exportação de nutrientes nos grãos, ou seja, de acordo com o rendimento de grãos pode-se estimar a quantidade de nutrientes que está sendo exportado nos grãos, possibilitando assim, o ajuste na demanda por nutrientes que deverá ser repostado ao solo. Li et al. (2007) ainda destaca que a definição de zonas de manejo deve-se basear em informações espaciais que são estáveis ou previsíveis ao longo do tempo e que as informações sobre rendimento de culturas representam a melhor forma de diagnosticar essas variações no campo.

Na AP o rendimento das culturas é monitorado principalmente por um conjunto de sensores acoplados nas colhedoras que de modo sincronizado, produzem os denominados mapas de rendimento (BLACKMORE e MOORE, 1999). Contudo, do processo de colheita a obtenção dos mapas de rendimento, erros atribuídos ao sensor, as condições de funcionamento, do operador e na redução dos dados de rendimento podem acontecer, o que compromete a qualidade dos resultados gerados (ARSLAN; COLVIN, 2002). Além disso, o conjunto de monitores de colheita ainda apresentam alto custo de aquisição e manutenção, o que dificulta a adoção massiva dessa tecnologia.

Nesse enfoque, a utilização de outras tecnologias que apresentem correlação com o rendimento das culturas e possam ser utilizadas como parâmetros para substituir e/ou integrar o conjunto de dados para a confecção de zonas de manejo quando a qualidade dos mapas de rendimento não forem apropriadas, pode ser de interesse de estudo. Índices de vegetação podem ser uma alternativa pois de acordo com Tucker et al. (1980) até 64% de variabilidade no rendimento de grãos pode ser explicado por dados espectrais. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (ROUSE et al., 1973) tornou-se um dos índices mais amplamente utilizados seja por meio de sensores portáteis, embarcados em máquinas ou por meio de imagens de satélites (TARNAVSKY et al., 2008), mas também, principalmente pela sua correlação com o rendimento das culturas (BOKEN; SHAYKEWICH, 2002; SULTANA et al., 2014; LOPRESTI et al., 2015; PERALTA et al., 2016). Os avanços indicam a utilização constante de imagens de satélite e mais recentemente imagens obtidas com RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) para calcular o NDVI, mediante a eficiência e a acurácia nos resultados proporcionadas com os mesmos (COLOMINA; MOLINA, 2014).

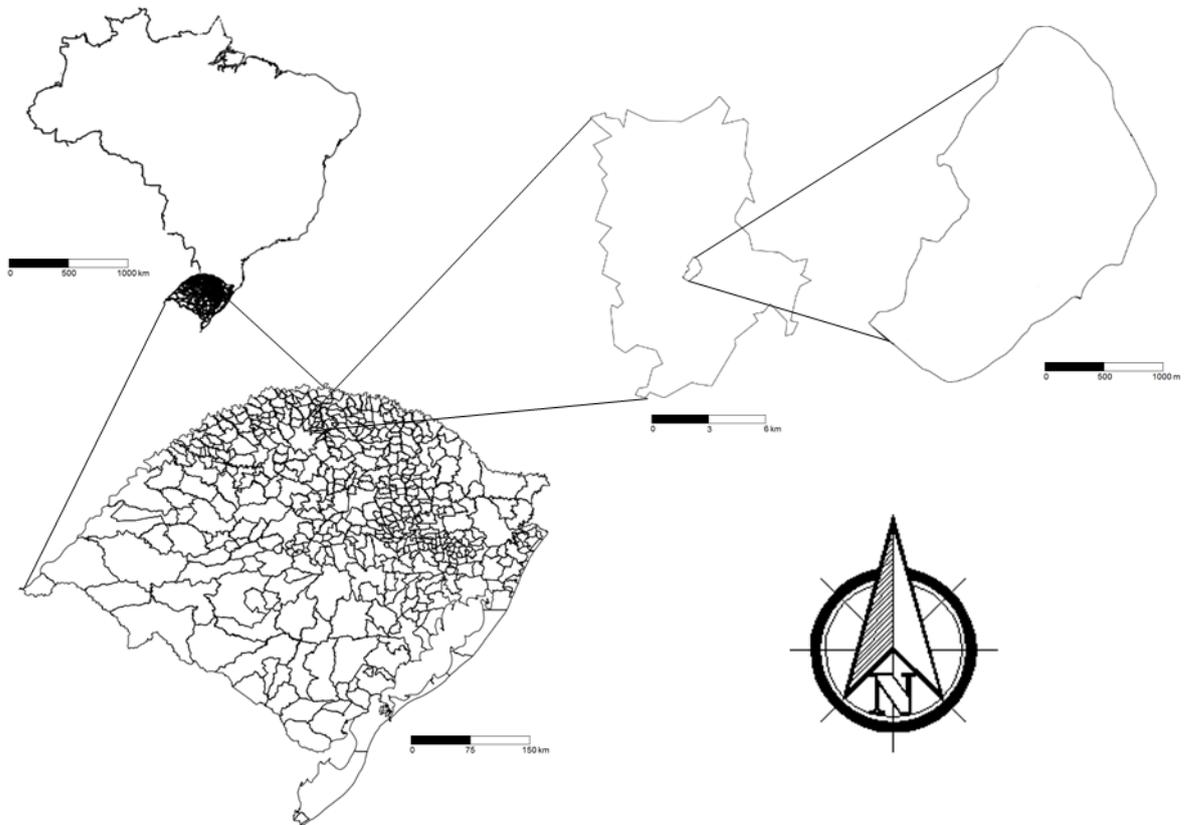
Diante disso, compreender a relação existente entre zonas de manejo geradas com mapas de rendimento e com NDVI obtido a partir de imagens de satélite torna-se primordial para o embasamento em outros estudos que buscam incrementar a qualidade na delimitação de zonas de manejo. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo caracterizar as zonas de manejo obtidas a partir de mapas de rendimento e NDVI obtido a partir de imagens de satélite em uma área de Latossolo Vermelho sob clima subtropical no sul do Brasil.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em área experimental localizada no município de Boa Vista das Missões, Rio Grande do Sul (RS), Brasil, situada entre as coordenadas de latitude: 27°42'38" S a 27°43'33" S e longitude: 53°20'04" O a 53°20'26" O, totalizando uma área cultivada de 117,17 ha (Figura 1). O clima da região é subtropical úmido com verão quente, tipo Cfa, com máximas iguais ou superiores a 22°C, mínimas entre -3 a 18°C e precipitação média anual entre 1.900 e 2.200 mm (ALVARES et al., 2013).

Figura 1 – Localização geográfica da área experimental utilizada no estudo



O relevo da região é suave ondulado e o solo presente na área experimental, foi classificado como Latossolo Vermelho (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa. O manejo utilizado na área inclui a adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) há mais de 20 anos e a utilização de ferramentas de AP, como amostragem georreferenciada de solo, taxa variada de corretivos e fertilizantes e monitoramento georreferenciado da colheita. O histórico de cultivos e do manejo de correções e adubações na área estudada é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico de cultivos, práticas de adubações na área estudada entre os anos de 2008 a 2014

Ano	Período	Cultura	Adubação	Quantidade	Aplicação
2008	Inverno	Aveia Preta	**	**	**
	Verão	Milho	11.52.00	180 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
2009	Inverno	Aveia Branca	30.00.20	280 kg ha ⁻¹	Cobertura
			11.52.00	120 kg ha ⁻¹	Base
	Verão	Soja	45.00.00	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
2010	Inverno	Aveia Branca	02.25.15	300 kg ha ⁻¹	Base
			05.20.20	90 kg ha ⁻¹	Base
	Verão	Milho	18.46.00	150 kg ha ⁻¹	Base
2011	Inverno	Aveia Preta	00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
			45.00.00	160 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Soja	**	**	**
2012	Inverno	Aveia Branca	18.46.00	120 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Milho	**	**	**
2013	Inverno	Trigo	18.46.00	140 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Soja	45.00.00	200 kg ha ⁻¹	Cobertura
2014	Inverno	Aveia Preta	11.52.00	140 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	130 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Soja	01.18.00	300 kg ha ⁻¹	Base
2014	Verão	Soja	11.52.00	150 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	200 kg ha ⁻¹	Cobertura

** Sem Adubação

Fonte: Dados cedidos pelo proprietário da área.

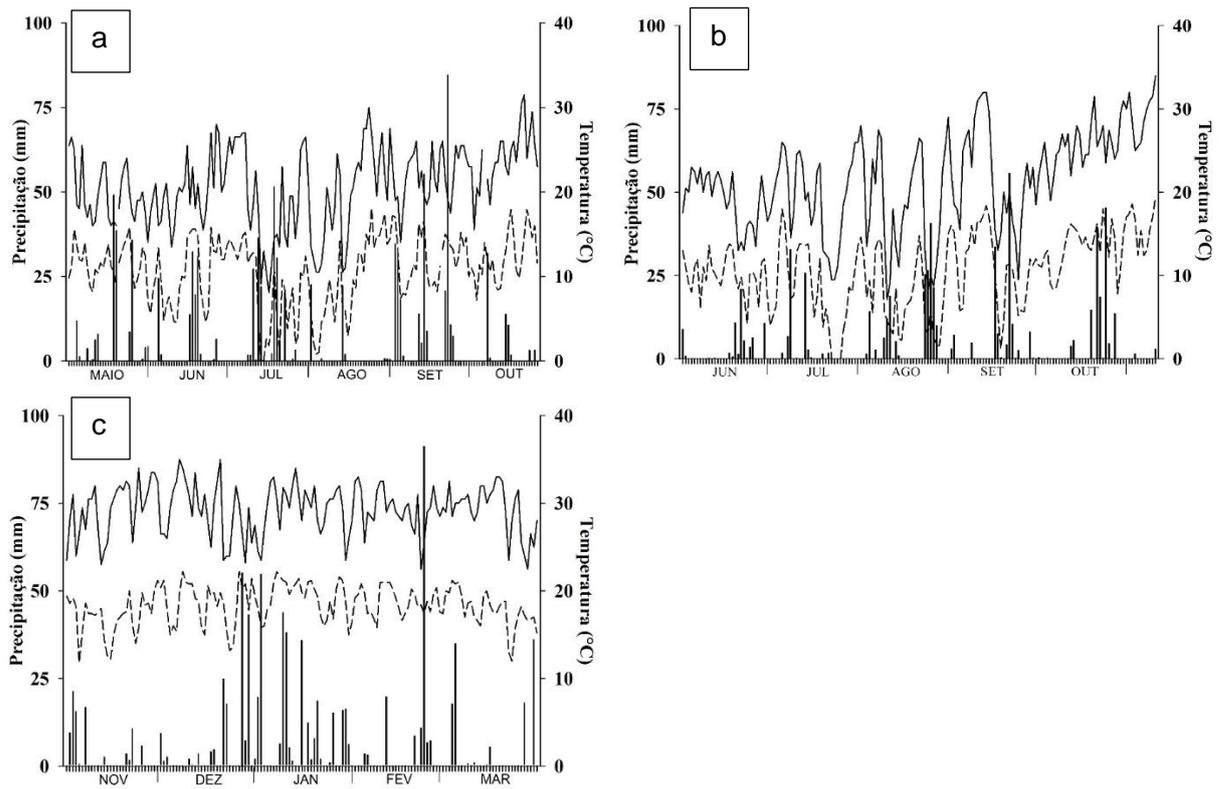
Mapas de rendimento

Os mapas de rendimento foram obtidos a partir de uma colhedora marca CASE® modelo Axial-Flow 2399, contendo o sistema de agricultura de precisão AFS® (Advanced Farming System). O sistema era composto de um sensor instantâneo de grãos do tipo placa de impacto, instalado ao final do elevador de grãos limpos. Além disso, o monitor de colheita, associava as informações de velocidade de deslocamento e a largura da plataforma e armazenava as informações de rendimento de grãos de modo georreferenciado por meio de um sinal de GPS.

Mesmo com vários anos de monitoramento de colheita na área estuda, por motivo de que vários mapas temáticos estarem incompletos por problemas de armazenamento de dados,

foram selecionados apenas os mapas que continham um banco de dados completo. Desse modo, selecionou-se os mapas de rendimento das culturas da Aveia Branca no ano de 2010; Trigo no ano de 2013 e Soja as safras de 2014-2015.

Figura 2 – Temperatura diária mínima (---) e máxima (—) e precipitação diária (■), para os mapas de rendimento de Aveia Branca/2010 (a); Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c)



Após a seleção dos mapas de rendimento, estes foram filtrados, com o objetivo de eliminar erros grosseiros (MENEGATTI e MOLIN, 2004). Para isso, cada arquivo de dados foi processado no programa SMS Advance® - Ag Leader Technology e posteriormente exportado para o programa CR - Campeiro 7 (GIOTTO; ROBAINA, 2007), onde os dados foram filtrados, eliminando-se em um raio de pesquisa de 50 metros os pontos com coeficiente de variação (CV%) superior a 30%, que caracterizam rendimentos inconsistentes (SHIRATSUCHI, 2004).

Imagens de satélite

As imagens de satélite foram oriundas da série Landsat. As imagens foram adquiridas através do site USGS Earth Explorer, que dispõem de um banco de dados de acesso livre. O download das imagens foi realizado no formato GeoTiff, apresentando 30 m de pixel.

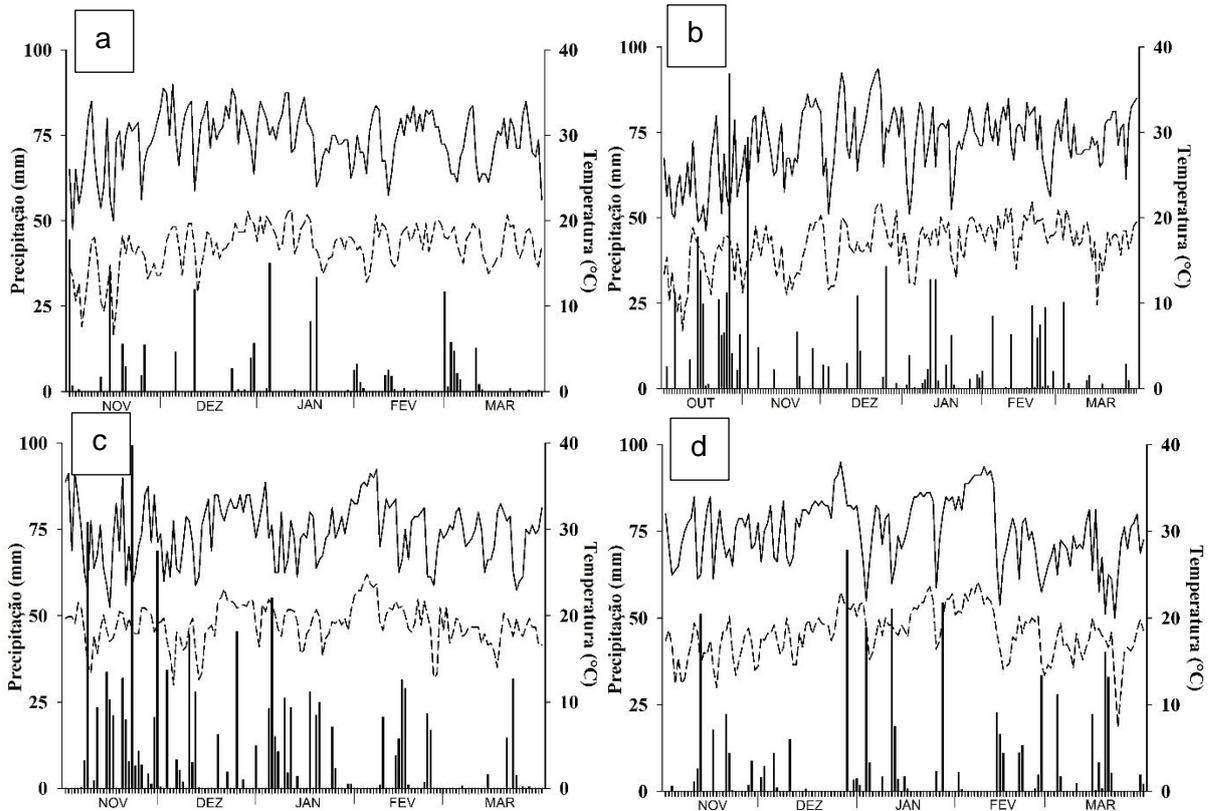
Para cada mapa de rendimento buscou-se selecionar as imagens de satélite que compreendessem uma data dentro do ciclo da cultura em questão. Foram selecionadas as imagens de satélite que apresentaram melhor qualidade, isto é, sem a presença de nuvens sob a área de estudo. A partir das imagens de satélite calculou-se o NDVI com o software QuantumGIS (OSGeo), conforme a Equação 1, proposta por Rouse et al. (1973).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

onde: NIR é a banda do infravermelho próximo (banda 5) e R é a banda do vermelho (banda 4).

Ademais, foram selecionadas outras imagens de satélites, segundo o histórico de cultivo da área de estudo, com o intuito de verificar a estabilidade do NDVI gerado em diferentes anos de cultivo. Com isso, selecionou-se as culturas da Soja na safra de 2007/2008; Milho na safra de 2008/2009; Soja na safra de 2009/2010 e Soja na safra de 2013/2014 (Figura 3).

Figura 3 – Temperatura diária mínima (---) e máxima (—) e precipitação diária (■), para as culturas da de Soja/2007 (a); Milho/2008 (b); Soja/2009 (c) e Soja/2013



Os detalhes correspondentes as datas de aquisição das imagens de satélites para cada mapa de rendimento e as imagens de satélite para as demais culturas estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Datas dos eventos de colheitas e de aquisição de imagens de satélites utilizadas para a confecção dos mapas de rendimento e do NDVI obtidos segundo os mapas de rendimento (NDVI com referência) e do NDVI obtido em outras culturas (NDVI sem referência)

Cultivos	Eventos de colheita		Imagens de satélite	
	Semeadura	Colheita	Aquisição	Estágio
NDVI com referência				
Aveia Branca	26/05/2010	19/10/2010	20/08/2010	60 (final do espigamento) ¹
Trigo	17/06/2013	01/11/2013	13/09/2013	55 (50% do espigamento) ¹
Soja	08/11/2014	25/03/2015	22/01/2015	R 5.3 (vagens com 26% e 50% de granação) ²
NDVI sem referência				
Soja	20/11/2007	24/03/2008	04/02/2008	R 5.5 (vagens com 50% e 75% de granação) ²
Milho	06/10/2008	09/03/2009	05/01/2009	R 5 (grãos farináceos-duros) ³
Soja	28/11/2009	31/03/2010	24/01/2010	R 5.1 (10% granação) ²
Soja	17/11/2013	28/03/2014	19/01/2014	R 4 (vagens completamente desenvolvidas) ²

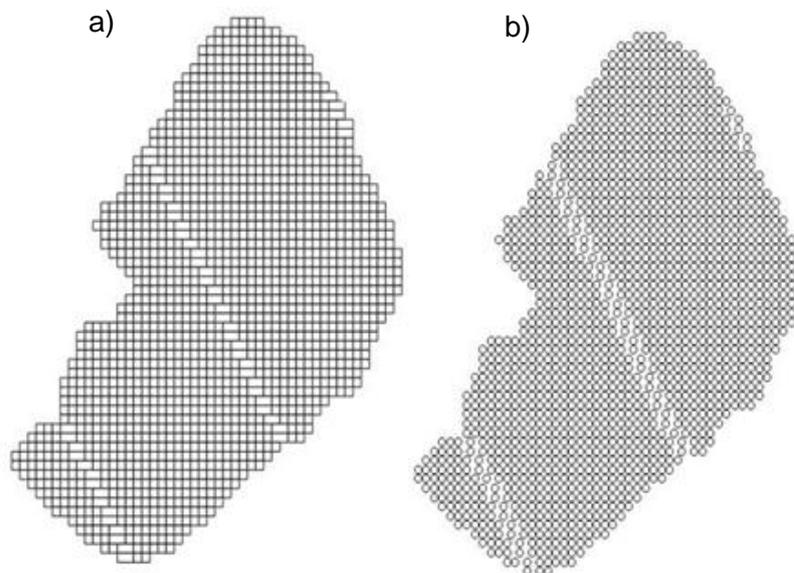
¹Zadoks et al. (1974); ²Ritchie et al. (1982); ³Ritchie et al. (1993).

Para evitar erros de decorrentes da sobreposição das imagens de satélite na área de estudo, considerando principalmente os limites da área que apresentavam-se próximos a

árvores, reservatórios de água, solo desnudo entre outros, realizou-se a filtragem dos dados de NDVI em cada situação avaliada, excluindo-se os valores de NDVI em uma faixa de 10 m a partir da bordadura em toda a área.

Após o cálculo do NDVI, as imagens de satélite foram exportadas para o QuantumGIS, onde para cada pixel adicionou-se um ponto centroide, que corresponde ao valor de NDVI do centro do pixel (Figura 4), sendo que os centroides herdaram os mesmos atributos dos polígonos gerados a partir dos pixels. Este procedimento, buscou facilitar as análises posteriores juntamente com os mapas de rendimento, já que estes apresentam a configuração em pontos de rendimento.

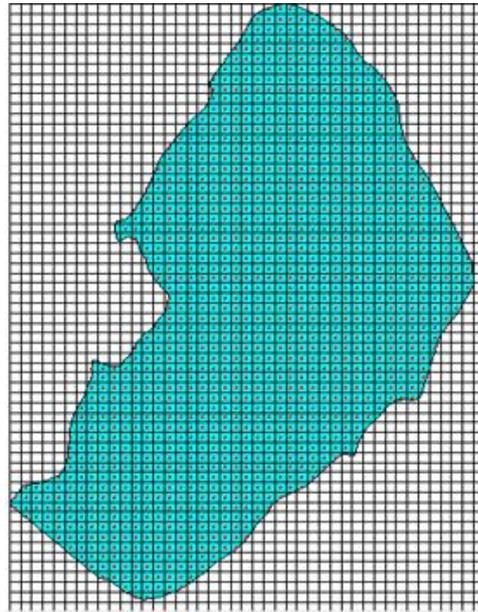
Figura 4 – Representação do transformação dos valores de cada pixel (a) em um ponto centroide nos mesmos (b)



Análise de dados

Os dados referentes aos mapas de rendimento e os mapas de NDVI, foram sobrepostos em uma malha quadriculada de 30 x 30 m (0,09 ha), que resultou em 1308 pontos (Figura 5). A sobreposição da malha quadriculada tem com objetivo permitir a comparação temporal entre mapas (mesmo número de células) (EITELWEIN, 2013), e principalmente por ser essa a dimensão do pixel da imagem de satélite (30 m), em que buscou-se que os pontos de rendimento coincidisse com os pontos de NDVI na área.

Figura 5 – Esquema da disposição espacial da malha de 30 x 30 m utilizada para a sobreposição dos mapas de rendimento e NDVI



Os dados foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, com o auxílio do programa computacional Statistical Analysis System – SAS 8.0. Os parâmetros estatísticos determinados foram: mínimo, média, máximo, desvio padrão e coeficientes de variação (CV%), de assimetria (C_s) e de curtose (C_k). Com base nos valores de CV(%) obtidos, a dispersão dos dados foi classificada em: baixa, para CV <15%; moderada, para CV de 15 a 35%; e alta, para CV >35% (WILDING e DREES, 1983). Os valores de C_k , que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, que geralmente é a curva normal, foram classificados em: $C_k = 0$ distribuição é mesocúrtica, $C_k < 0$ platicúrtica e $C_k > 0$ leptocúrtica. Os valores de C_s que visam caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados em: $C_s > 0$ distribuição assimétrica à direita; $C_s < 0$ distribuição é assimétrica à esquerda; e $C_s = 0$, a distribuição é simétrica. Verificou-se também, a existência de tendência central (normalidade) dos dados originais por meio do Teste W ($p < 0,05$), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram p -valor $> 0,05$.

Em virtude de que a maioria das variáveis não apresentavam distribuição normal, utilizou-se a correlação de Spearman com a finalidade de observar a similaridade entre a produtividade das culturas ao longo dos anos. Esse tipo de correlação é uma técnica estatística não paramétrica análoga ao coeficiente de correlação de Pearson, sendo mais indicada em

casos onde os dados não seguem uma distribuição paramétrica (PASSARI et al., 2011). Neste estudo considerou-se apenas as variáveis que apresentaram correlação de Spearman superior a 0,30. Esse valor de 0,30 para o coeficiente de correlação foi estabelecido arbitrariamente.

Nos dados de rendimento e de NDVI, aplicou-se a regressão múltipla Stepwise ($Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$). Seu funcionamento ocorre através da sistemática adição ou remoção de variáveis na regressão, realizada com base em um teste estatístico de significância de cada variável, sendo que neste estudo, adotou-se o nível de significância de 5%, que inclui no modelo final, somente variáveis que influem decisivamente na variável dependente. As equações foram avaliadas conforme o coeficiente de determinação, erro padrão residual e o teste de Durbin-Watson. O teste de Durbin-Watson varia de 0 a 4 em que valores mais próximos de 2 indicam valores ótimos (NETER et al., 1985), ou seja, a não existência de autocorrelação dos dados. Com a regressão de stepwise é possível identificar se realmente o NDVI calculado para cada mapa de rendimento e o NDVI calculado para as outras culturas, realmente apresentam influencia no rendimento.

A análise geoestatística foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (VIEIRA, 2000), sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear) utilizando-se o programa computacional Gamma Design Software – GS+ (ROBERTSON, 1998). O ajuste dos modelos foi realizado com base no melhor coeficiente de determinação (r^2) e na menor soma de quadrados do resíduo (SQR), e foi confirmado pela técnica de validação cruzada. Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar (C_0+C_1) e alcance (a). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação: $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$. Com base nos IDE, classificou-se o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para $IDE \leq 25\%$; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para $IDE > 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994).

Depois de analisar os semivariogramas dos dados e sendo observada a dependência espacial entre as amostras, utilizou-se o software SURFER 11® para a espacialização dos resultados por meio de mapas temáticos. O interpolador utilizado foi a krigagem ordinária, levando-se em conta os parâmetros do semivariograma (modelo ajustado, efeito pepita, alcance e patamar) determinados pela análise geoestatística.

Zonas de Manejo

Para a confecção das zonas de manejo utilizou-se o software Management Zone Analyst (MZA) 1.0.1 (FRIDGEN et al., 2004). Esse software utiliza o *fuzzy c-means clustering algorithms* ou algoritmos de agrupamento difuso, que tem o propósito de particionamento das observações no espaço em grupos *c* ou clusters. O termo “Fuzzy” refere-se à associação compartilhada entre as classes.

Utilizou-se os índices fuzziness performance index (FPI) e normalized classification entropy (NCE) para determinar o melhor número de clusters (zonas de manejo), assim como o desempenho geral dos mesmos. O FPI (Equação 1) ou índice de desempenho de imprecisão é uma medida do grau das diferentes classes de associação (imprecisão) e os valores variam entre 0 e 1 (ODEH et al., 1992). Já o NCE (Equação 2) ou entropia da partição modificada, é utilizada para decidir quantos clusters são mais adequados para a definição das zonas de manejo (BEZDEK, 1981). O número ideal de clusters ocorre quando os dois índices são mínimos (FRIDGEN et al., 2004)

$$FPI = 1 - \frac{c}{(c-1)} \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^2 \right] \quad (1)$$

$$NCE = \frac{n}{n-c} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} \log_a(u_{ik})$$

onde: *c* = valores dos centróides do cluster; *u_{ik}* = valores para cada observação *K* e cluster *i*; \log_a = qualquer número inteiro positivo e *n* = número de dados analisados.

As configurações escolhidas foram medida de similaridade euclidiana; expoente fuzziness = 1,3; número máximo de iterações = 300; critério de convergência = 0,0001; número mínimo de zonas = 2 e o número máximo de zonas = 8.

Com a finalidade de discriminar o grau de diferenciação entre as zonas de manejo depois de definidas, em cada uma das mesmas selecionou-se 50 pontos amostrais representativos de sete repetições e aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística descritiva dos mapas de rendimento e o NDVI calculado para cada mapa de rendimento, bem como, o NDVI calculado para diferentes culturas, está representado na Tabela 3. A produtividade da Aveia Branca/2010 variou de 710,90 a 2.435,94 kg ha⁻¹ com uma produtividade média de 2.435,94 e apresentando CV de 20,51%, sendo esse o maior valor entre os mapas de rendimento, contudo sendo classificado como moderado (WILDING; DREES, 1983).

Tabela 3 – Estatística descritiva dos mapas de rendimento e dos valores de NDVI obtidos segundo os mapas de rendimento (NDVI com referência) e de NDVI obtido em outras culturas (NDVI sem referência)

Eventos de colheita	Mínimo	Média	Máximo	CV% ¹	DP ²	Cs ³	Ck ⁴	W ⁵
Mapas de rendimento								
Aveia Branca/2010	710,90	2.435,94	3.637,01	20,51	499,71	-0,33	-0,34	0,98*
Trigo/2013	2.818,13	3.850,33	5.109,63	9,07	349,40	0,05	0,12	0,24 ^{ns}
Soja/2014	2.409,28	3.778,93	4.535,14	8,27	309,78	-1,27	2,17	0,91*
NDVI com referência								
Aveia Branca/2010	0,25	0,47	0,51	7,37	0,04	-4,05	35,96	0,74*
Trigo/2013	0,29	0,55	0,63	7,19	0,03	-3,99	25,52	0,66*
Soja/2014	0,31	0,51	0,66	8,70	0,04	-5,87	54,31	0,57*
Média	0,29	0,57	0,62	6,68	0,03	-5,16	41,64	0,60*
NDVI sem referência								
Soja/2007	0,34	0,71	0,80	6,60	0,05	-3,80	30,01	0,75*
Milho/2008	0,32	0,62	0,73	6,34	0,03	-1,56	5,27	0,89*
Soja/2009	0,40	0,73	0,79	7,41	0,05	-5,95	56,86	0,54*
Soja/2013	0,32	0,51	0,56	8,70	0,04	-5,87	54,31	0,57*
Média	0,29	0,64	0,68	5,41	0,03	-5,57	46,81	0,57*

¹ Coeficiente de variação; ² Desvio Padrão; ³ Coeficiente de assimetria; ⁴ Coeficiente de curtose; ⁵ Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: * significativo em níveis de $p < 0,05$ e ^{ns} não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

A produtividade de Trigo/13 variou de 2.818,13 a 5.109,63 kg ha⁻¹ apresentando como média 3.850,33 kg ha⁻¹ e com CV de 9,07%, sendo classificado como baixo (WILDING; DREES, 1983). O mapa de rendimento de Trigo/13, foi o único entre os mapas de rendimento a apresentar distribuição normal dos dados, justificando-se pelos coeficientes de assimetria e curtose próximos à zero, sendo de 0,05 e 0,12 respectivamente (Tabela 3). Quando o objetivo for confecção de mapas com as ferramentas da geoestatística, a normalidade dos dados possibilita uma melhor predição dos valores não amostrados (WEBSTER e OLIVER, 2007), sendo nesse caso, mapas de rendimento da cultura de trigo podem influenciar a qualidade da informação, principalmente em casos onde o objetivo for utilizar um conjunto de informações para gerar o resultado, como é o caso da confecção de zonas de manejo.

A Soja/14 teve como amplitude de produtividade compreendida entre 2.409,28 a 4.535,14 kg ha⁻¹ e média de 3.778,93 kg ha⁻¹ com um CV de 8,27% sendo também considerado baixo (Tabela 3). Assim como para a cultura da Aveia Branca/10, a Soja/10 não

seguiu distribuição de frequência normal, sendo confirmados pelos coeficientes de assimetria, deslocados à esquerda ($C_s < 0$) e coeficientes de curtose com distribuições platicúrticas ($C_k < 0$) e leptocúrticas ($C_k > 0$).

Os baixos valores dos coeficientes de curtose obtidos para os mapas de rendimento de grãos de Aveia Branca/10, Trigo/13 e Soja/14, podem estar indicando uma maior variabilidade espacial do rendimento de grãos, ou seja, maiores desvios em relação à média central, o que pode estar caracterizando uma área mais heterogênea e, portanto, com elevado potencial para distinção entre áreas rendimento de grãos.

No NDVI com referência da Aveia Branca/10, os valores variaram de 0,25 a 0,51, com média de 0,47. O NDVI do Trigo/13 apresentou valores que variaram de 0,29 a 0,63 e média de 0,55. Na Soja/14 os valores variaram de 0,31 a 0,66 com média de 0,51. Na média do NDVI dos três cultivos os valores de mínimo e máximo foram de 0,29 e 0,62 respectivamente (Tabela 3). Para o NDVI relativo aos três cultivos e no NDVI da média dos mesmos, o CV foi classificado como baixo, apresentando baixa dispersão dos dados. Em geral dos coeficientes de assimetria e curtose foram bem caracterizados para o NDVI com referência dos três cultivos e na média dos mesmos, apresentando coeficientes de assimetria, deslocados à esquerda ($C_s < 0$) e coeficientes de curtose com distribuições leptocúrticas ($C_k > 0$).

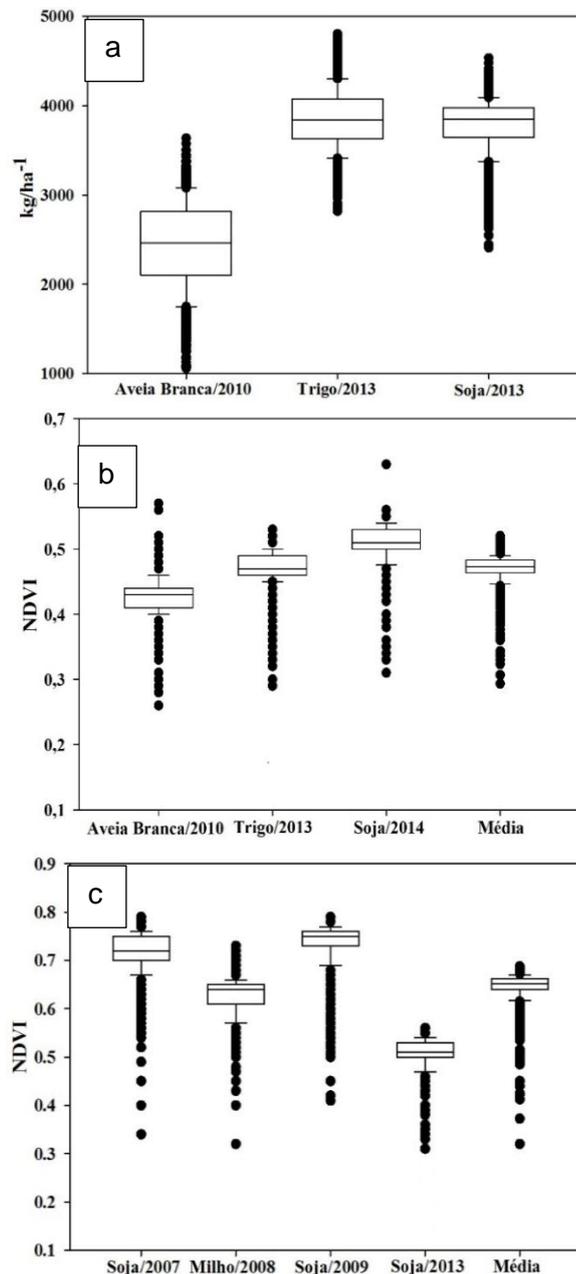
Para o NDVI sem referência, na cultura da Soja/2007 os valores de NDVI variaram de 0,34 a 0,80 com média de 0,71. Na cultura do Milho/2008 a amplitude foi de 0,32 a 0,73 e com média de 0,62 (Tabela 3). A cultura da Soja/2009, os valores de mínimo e máximo foram de 0,40 a 0,79 respectivamente, com média de 0,73. Na Soja 2013 os valores variaram de 0,32 a 0,56 e média de 0,51. Na média dos quatro cultivos avaliados, os valores de mínimo e máximo foram de 0,29 a 0,68 respectivamente com média de 0,64. Da mesma forma como observado para o NDVI com referência os valores do NDVI sem referência os CVs foram classificados como baixos, sendo de 6,60; 6,34; 7,41; 8,70 e 5,41 para Soja/2007; Milho/2008; Soja/2009; Soja/2013 e na média dos quatro cultivos respectivamente.

Como observado os valores de NDVI com referência e NDVI sem referência não apresentaram representativas variações quanto aos valores do CV, sendo que isso pode ser explicado pelo fato de que as datas em que as imagens de satélite foram adquiridas, coincidiram em períodos de bom suprimento hídrico (Figura 2) o que reduz a possibilidades de valores anormais e em consequência a eventuais erros. Segundo Hmimina et al. (2013), o NDVI está na sua máxima expressão durante o período das chuvas, onde há bom suprimento hídrico. Outro fator da baixa variação, pode ser devido aos estágios das culturas no momento da aquisição das imagens, onde todas as culturas avaliadas estavam em estágio avançado, ou

seja, com alto LAI (índice de área foliar), o que culminou em menor variação espectral, interferindo no NDVI.

Com gráficos Box-plot (Figura 6) ratificam-se os resultados encontrados na Tabela 1, onde não foi encontrada distribuição normal para a maioria das variáveis analisadas, mediante a observação de valores acima e abaixo das linhas verticais.

Figura 6 – Box-plot dos diferentes cultivos para os mapas de rendimento (a), NDVI com referência (b) e NDVI sem referência (c). Linha horizontal dentro de cada caixa indica a mediana; os limites superior e inferior representam os 75° e 25° percentis; as barras verticais acima e abaixo da caixa representam o 90° e o 10° percentis e os círculos sólidos acima e abaixo das barras verticais indicam os valores fora dos limites de confiança



Para os mapas de rendimento a Aveia Branca/2010 foi o que apresentou maior amplitude entre os cultivos, o que indica que a mesma apresenta uma discriminação maior para de identificar a variabilidade dos dados (Figura 6a). Nos resultados para o NDVI com referência (Figura 6b), observou-se a mesma tendência dos mapas de rendimento, em que os valores de NDVI para Aveia Branca/2010 foram os mais baixos entre os cultivos. Já no NDVI sem referência (Figura 6c) foram encontradas as maiores variações, sendo que esse efeito pode ser devido as diversas condições ambientais e de manejo durante o ciclo das culturas o que provavelmente influenciou na produtividade na área. Em geral observou-se que nos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência, resultados fora dos valores adjacentes superior e inferior, porem esses valores foram utilizados nas demais análises, pois tem-se a premissa que a retirada dos mesmos poderia eliminar variações sazonais e resultados a curto prazo, podendo mascarar padrões importantes de séries temporais (OMUTO, 2012).

Com a análise da correlação de Spearman apresentados na Tabela 4, observou-se que para cada mapa de rendimento houve correlação $> 0,30$ para seu respectivo resultado de NDVI (NDVI com referência). Os mapas de rendimentos da Aveia Branca/2010 e da Soja/2014 apresentaram correlação de 0,36 com seus respectivos valores de NDVI, podendo ser consideradas semelhantes quanto a magnitude dos valores de NDVI calculados por imagens de satélite. No mapa de rendimento de Trigo/2013 a correlação foi de 0,47 com seu NDVI representativo, sendo considerado alto quando comparado as correlações obtidas entre os mapas de Aveia Branca/2010 e Soja/2014 e seus valores de NDVI representativos.

Tabela 4 – Matriz de correlação de Spearman a 1% de probabilidade de erro ($p \leq 0,01$) entre os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência

	MRAB10	MRT13	MRS14	RAB10	RT13	RS14	RM	SS07	SM08	SS09	SS13	SM
MRAB10	-											
MRT13	0,03	-										
MRS14	0,30	0,27	-									
RAB10	0,36	0,24	0,27	-								
RT13	0,03	0,47	0,19	0,27	-							
RS14	0,20	0,06	0,36	0,26	0,48	-						
RM	0,15	0,34	0,36	0,67	0,73	0,78	-					
SS07	0,15	0,09	0,17	0,06	0,26	0,21	0,43	-				
SM08	0,19	0,33	0,15	0,17	0,01	0,03	0,10	0,06	-			
SS09	0,37	0,07	0,34	0,28	0,08	0,17	0,22	0,05	0,12	-		
SS13	0,30	0,46	0,36	0,26	0,48	0,88	0,78	0,52	0,06	0,17	-	
SM	0,34	0,14	0,35	0,32	0,31	0,60	0,57	0,68	0,48	0,47	0,60	-

* Valores destacados em negrito apresentam correlação $> 0,30$. Mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (MRAB10); mapa de rendimento do Trigo/2013 (MRT13); mapas de rendimento da Soja/2014 (MRS14); NDVI com referência da Aveia Branca (RAB10); NDVI com referência do Trigo/2013 (RT13); NDVI com referência da Soja/2014 (RS14); NDVI com referência da média dos três cultivos (RM); NDVI sem referência da Soja/2007 (SS07); NDVI sem referência do Milho/2008 (SM08); NDVI sem referência da Soja/2009 (SS09); NDVI sem referência da Soja/2013 (SS13) e NDVI sem referência da média dos quatro cultivos (SM).

As correlações significativas e $> 0,30$ obtidas entre os mapas de rendimentos e os NDVI com referência, destacam que o NDVI calculado a partir de imagens de satélites pode ser utilizado como variável indicadora na confecção de zonas de manejo (Tabela 4). Zhang et al. (2010), também encontraram correlação entre rendimento e o NDVI calculado por imagens de satélite, confirmando a relação existente entre refletância espectral oriundas das culturas de interesse, podendo-se assim, se utilizada pra mapear o rendimento das mesmas. Cabe destacar também, que o NDVI calculado a partir de imagens de satélites, quando bem definidas quanto a eventuais erros (sobreposição, nuvens, estágio da cultura entre outros), podem substituir os mapas de rendimentos, visto que, o monitoramento da colheita muitas vezes não é realizado e ainda os monitores de rendimento apresentam alto custo de aquisição e manutenção.

Para os resultados do NDVI sem referência, constatou-se que entre os quatro cultivos avaliados, pelo menos dois apresentaram correlação $> 0,30$ com os mapas de rendimento. Os mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 e Soja/2014 apresentaram correlação com o NDVI sem referência da Soja/2009 e Soja/2013, com coeficientes de correlação de 0,37 e 0,30 e 0,34 e 0,36 respectivamente. O mapa de rendimento de Trigo/2013 correlacionou-se com o NDVI sem referência do Milho/2008 e Soja/2013, com coeficientes de correlação de 0,33 e 0,46, respectivamente (Tabela 3). Apenas o NDVI sem referência da Soja/2007 não apresentou correlação $> 0,30$ com nenhum dos mapas de rendimento avaliados, sendo que

isso pode ser explicado pelo fato de que foi apenas no verão de 2008 que foram realizados os manejos mais específico na área, como a adubação a taxa variada amostragem de solo entre outros, o que pode ter levado a algum déficit para o bom desenvolvimento da cultura da soja neste ano e além disso, observou-se baixa precipitação durante o cultivo nessa data (Figura 3a).

As médias do NDVI com referência e NDVI sem referência apresentaram correlação $> 0,30$ para pelo menos dois mapas de rendimento. O NDVI com referência da média dos três cultivos apresentou correlação com o mapa de rendimento do Trigo/2013 e Soja/2014 com coeficientes de 0,34 e 0,36 respectivamente. Já o NDVI sem referência da média dos quatro cultivos correlacionou-se com os mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 e da Soja/2014, com coeficientes de correlação de 0,34 e 0,35 respectivamente. Esses resultados indicam que apesar de que a média do NDVI com referência e sem referência serem oriundas de diferentes culturas, as condições climáticas referentes a suprimento hídrico, bem como, temperatura mínima e máxima (Figura 2 e Figura 3), adequadas para as culturas, o que permitiu minimizar a variação do NDVI calculado (HMIMINA et al., 2013).

Com as equações de Stepwise pode-se estimar, qual a influência de cada componente estudado para cada variável dependente em questão relativos aos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência (Tabela 5).

Tabela 5 – Equação de Stepwise para estimativa dos componentes de cada variável dependente referentes dos mapas de rendimento NDVI com referência e NDVI sem referência

Eventos de colheita	Equação	r ²	EP	DW
Mapas de rendimento				
Aveia Branca/2010	$Y = -1234 + 0,46MRS14 + 3430,66SM - 2341,94RT13 + 1857,31RAB10$	0,69	8,49	1,79
Trigo/2013	$Y = 1228 + 6321,76RT13 - 2362SS09 + 0,31MRS14 + 2205,22SM08 - 2351,71SS13$	0,71	7,4	1,69
Soja/2014	$Y = 2316,83 + 3485,25RS14 + 3296,67S10 - 3654,67SME$	0,88	7,7	1,82
NDVI com referência				
Aveia Branca/2010	$Y = 0,006 + 2,86RM - 0,93SS13 - 0,98RT13 + 0,047MRAB10$	0,83	3,23	1,71
Trigo/2013	$Y = -0,007 + 2,06RM - 0,59SS13 - 0,46RAB10 + 0,01MRT13$	0,92	2,03	1,65
Soja/2014	$Y = 0,01 + 1,01SS13 - 0,01RT13$	0,95	0,88	1,64
Média	$Y = 0,10 + 0,39RT13 + 0,33SS13 + 0,25RAB10$	0,92	0,92	1,86
NDVI sem referência				
Soja/2007	$Y = 0,06 + 2,08SM - 0,54SS09 - 0,47SM08$	0,47	4,06	0,41
Milho/2008	$Y = 0,144 + 1,73SM - 0,74RM - 0,39SS09$	0,78	3,13	1,92
Soja/2009	$Y = -0,02 + 2,06SM - 0,53SM08 - 0,57SS13 + 0,23RAB10 - 0,01MRT13$	0,80	3,31	1,65
Soja/2013	$Y = -0,01 + 0,87RS14 + 0,32RM - 0,08RAB10 - 0,09RT13 - 0,01MRT13$	0,95	0,83	1,63
Média	$Y = 0,47 + 0,13RM + 0,30SM08 + 0,29SS09 + 0,27SS13$	0,93	1,48	1,82

EP: Erro padrão residual (%); DW: teste de Durbin-Watson. Mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (MRAB10); mapa de rendimento do Trigo/2013 (MRT13); mapas de rendimento da Soja/2014 (MRS14); NDVI com referência da Aveia Branca (RAB10); NDVI com referência do Trigo/2013 (RT13); NDVI com referência da Soja/2014 (RS14); NDVI com referência da média dos três cultivos (RM); NDVI sem referência da Soja/2007 (SS07); NDVI sem referência do Milho/2008 (SM08); NDVI sem referência da Soja/2009 (SS09); NDVI sem referência da Soja/2013 (SS13) e NDVI sem referência da média dos quatro cultivos (SM).

Nas equações estimadas para os mapas de rendimento da Aveia Branca/2010, Trigo/2013 e Soja/2014 observou-se que para ambos, o componente referente ao NDVI com referência calculado para os mesmos foram incluídos nas equações (Tabela 5). A inclusão do NDVI com referência calculado para cada mapa de rendimento nas equações, demonstra que o NDVI é influenciado pela variação no rendimento das culturas (ZHANG et al., 2010; HMIMINA et al., 2013; LOPRESTI, et al., 2015). No mapa de rendimento da Aveia Branca/2010 o valor de r^2 e do erro padrão residual foram o menor e o maior entre os mapas de rendimento sendo de 0,69 e 8,49 %, respectivamente, porém foram considerados aceitáveis para a validação da equação. Para o mapa de rendimento do Trigo/2013 o valor de r^2 e do erro padrão residual foram de 0,71 e 7,4 % respectivamente. Na equação definida para o mapa de rendimento da Soja/2014 o valor de r^2 e do erro padrão residual 0,88 e 7,7 %, em que o R^2 desta equação foi o maior entre os mapas de rendimento. Para os três mapas de rendimentos, o teste de teste de Durbin-Watson foi semelhante, com valores que variaram de 1,69 a 1,82, sendo valores próximos ao ideal 2, demonstrando que os dados não apresentam autocorrelação (NETER et al., 1985).

Assim como para os mapas de rendimento, nas equações geradas para o NDVI com referência os mapas de rendimento referente a cada cultura também foram incluídos nas equações, sendo que apenas para a Soja/2014 não foi observada essa constatação (Tabela 5). Nas equações do NDVI com referência da Aveia Branca/2010 e do Trigo/2013 foi incluído o NDVI com referência da média dos três cultivos, o que permite inferir que a valores representativos da média do NDVI, pode ser um importante componente de inclusão em estudos que busquem representar a variação histórica do NDVI e do rendimento de culturas agrícolas. De modo geral, os valores de r^2 e do erro padrão residual variaram de 0,83 a 0,95 e 0,88 a 3,23 respectivamente, sendo valores que indicam uma boa estimativa da equação. O teste Durbin-Watson não indicou autocorreção dos dados, sendo que os valores variaram de 1,64 a 1,86 sendo próximos de 2.

Em todas as equações do NDVI sem referência também observou-se a inclusão do NDVI com referência da média dos três cultivos e/ou o NDVI sem referência da média dos quatro cultivos, fortalecendo a hipótese discutida anteriormente nas equações estimadas para o NDVI com referência sobre a importância do cálculo da média para NDVI para a representação da sua variação temporal. A Soja/2007 apresentou o menor r^2 e o maior erro padrão residual, sendo de 0,47 e 4,06 respectivamente e além disso, a partir do teste de Durbin-Watson, verificou-se que o valor de 0,41, ou seja, próximo de zero, apontou para a existência de autocorrelação dos resíduos, indicando inconsistência nos valores de NDVI

calculado para esse cultivo. Já no demais cultivos, os valores de r^2 e do erro padrão residual foram considerados aceitáveis, em que os mesmos variaram de 0,78 a 0,95 e 0,83 a 3,31 respectivamente.

Entre os cultivos estudados para o NDVI sem referência, todos foram utilizados como componentes de uma ou mais equações, sendo que, apenas a Soja/2007 não foi incluída em nenhuma equação (Tabela 5). A não inclusão desse cultivo, como já discutido anteriormente, pode denotar do fato de que no ano de 2007 ainda não eram realizados os manejos mais eficientes na área de estudo, como a adubação a taxa variada amostragem de solo entre outros, sendo apenas realizados a partir do verão de 2008 e, além disso, observou-se baixa precipitação durante o cultivo nessa data (Figura 3a), onde a soma desses efeitos causaram discrepâncias nos valores de NDVI calculados pelas imagens de satélite. Como base nessa análise, destaca-se a importância de conhecer detalhadamente o histórico de cultivo e do manejo adotado em áreas em que o objetivo for a confecção de zonas de manejo. Com bases nos resultados obtidos com o NDVI sem referência para a Soja/2007, retirou-se esse cultivo dos demais procedimentos para a confecção das zonas de manejo.

A variabilidade espacial dos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência foi analisada a partir dos resultados da análise geoestatística (Tabela 6). Com os resultados da análise geoestatística verificou-se que para todos os eventos de colheitas avaliados nos mapas de rendimento NDVI com referência e NDVI sem referência apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permite a interpretação e projeção dos resultados com base na estrutura das suas variabilidades (VIEIRA, 2000).

Tabela 6 – Análise geoestatística para os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência

Eventos de colheita	Efeito Pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Contribuição (C_1)	Alcance (a)	Modelo	r^2	Dependência espacial	
							IDE ⁽¹⁾	GDE ⁽²⁾
Mapas de rendimento								
Aveia Branca/2010	218400	558338	339938	6484	Gaussiano	0,76	39,11	Moderado
Trigo/2013	87900	275226	187326	5610	Exponencial	0,88	31,93	Moderado
Soja/2014	69000	441377	372377	2460	Gaussiano	0,84	15,63	Forte
NDVI com referência								
Aveia Branca/2010	0,00095	0,0040	0,0031	2527	Gaussiano	0,86	23,28	Forte
Trigo/2013	0,00028	0,0011	0,00082	3376	Exponencial	0,73	25,45	Moderado
Soja/2014	0,00032	0,0014	0,00114	3014	Exponencial	0,95	21,91	Forte
Média	0,00030	0,0012	0,00097	3516	Exponencial	0,82	23,62	Forte
NDVI sem referência								
Milho/2008	0,00073	0,0047	0,0039	2510	Exponencial	0,85	15,46	Forte
Soja/2009	0,0011	0,0043	0,0032	4599	Exponencial	0,92	26,37	Moderado
Soja/2013	0,00049	0,0026	0,0021	3980	Exponencial	0,90	18,42	Forte
Média	0,63	2,99	2,36	3140	Exponencial	0,87	21,07	Forte

⁽¹⁾IDE: índice de dependência espacial; ⁽²⁾GDE: grau de dependência espacial.

Para os mapas de rendimento, o menor e o maior alcance foram de 2460 m para a Soja/2014 e 6484 m para a Aveia Branca/2010, respectivamente, sendo que o Trigo/2013 apresentou alcance de 5610 m. O grau de dependência foi moderado para a Aveia Branca/2010 e Trigo/2013 e forte para a Soja/2014 (Tabela 6). O ajuste do modelo gaussiano para Soja/2014 e exponencial para Trigo/2013, também foram ajustados nos estudos de Reichert et al. (2008) e Abreu et al. (2003) respectivamente. Em relação aos parâmetros dos semivariogramas ajustados todos os modelos foram enquadrados nos critérios de aceitação, ou seja, o r^2 do semivariograma foi igual ou maior que 0,50 e significativo a 5% na validação cruzada (AZEVEDO, 2004).

No NDVI com referência o menor e o maior alcance foram observados para a Aveia Branca/2010 (2517 m) e para a média dos três cultivos (3516 m). Apenas para a Aveia Branca/2010 o modelo ajustado foi gaussiano, sendo que para os demais, o modelo exponencial foi o mais adequado. Alguns estudos definem o modelo esférico como o mais adequado em semivariogramas do NDVI calculado por imagens de satélite (YANG et al., 2011; UNGARO et al., 2017), contudo, em outros estudos, como é o caso deste, o modelo exponencial é o mais adequado (LIN et al., 2009; JI et al., 2014) e ainda alguns semivariogramas que podem conter duas ou mais estruturas que combinam diferentes modelos matemáticos (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; TARNAVSKY et al., 2008). O grau de dependência espacial foi classificada como moderado apenas para o Trigo/2013, sendo classificada como forte para os demais. O r^2 foi igual ou maior que 0,50 e significativo a 5% na validação cruzada.

Para o NDVI sem referência, o alcance menor e maior foram observados para o Milho/2008 (2510 m) e Soja/2009 (4599 m). O modelo exponencial foi o ajustado para todos os cultivos do NDVI sem referência. O grau de dependência espacial foi classificada como moderado apenas para a Soja/2009, sendo que para os demais cultivos foram classificadas como forte, ou seja, apresentando com o efeito pepita ocupando <25% do patamar (CAMBARDELLA et al., 1994). Os valores de r^2 foram semelhantes variando de 0,85 a 0,92, sendo superiores a 0,50 e significativos a 5% na validação cruzada.

A distribuição espacial dos mapas rendimento são apresentados na Figura 7. Nota-se uma tendência de os maiores rendimentos se concentrarem na parte central do mapa, em uma faixa que se estende do sul ao norte do mesmo, principalmente para a Aveia Branca/2010 (Figura 7a) e Soja/2014 (Figura 7b). O mapa de rendimento de Trigo/2013 (Figura 7c), mostrou-se mais irregular quanto a distribuição das classes de rendimento, quando comparado aos mapas de Aveia Branca/2010 e Soja/2014, porém em ambos os três mapas de rendimento

foi possível observar a tendência de os locais de baixo rendimento na área estarem presentes nos mesmos.

Nos mapas de distribuição espacial do NDVI com referência Aveia Branca/2010 (Figura 8a) e Soja/2014 (Figura 8b) e da média dos três cultivos (Figura 8d), houve a tendência de manutenção das áreas de elevado NDVI com os altos rendimentos dos mapas de rendimento, porém sendo essa tendência mais observada no sul e centro-sul da área. O NDVI também foi eficiente em diagnosticar as áreas de baixos rendimentos observados nos mapas de rendimento, onde foram observados os menores valores de NDVI. A eficiência do NDVI obtido de imagens de satélite e sua concordância com mapas de rendimento também foram observados por outros trabalhos (GROTEN, 1993; BOKEN; SHAYKEWICH, 2002; LOPRESTI et al., 2015), demonstrando que o NDVI corresponde a magnitude da variabilidade no rendimento das culturas.

Os mapas referentes ao NDVI sem referência, também foram observados a tendência de manutenção dos locais de altos e baixos rendimentos da área, principalmente nos mapas de Soja/2009 (Figura 9b), Soja/2013 (Figura 9c) e da média dos três cultivos (Figura 9d). Essa concordância apenas não ocorreu de igual grau para o Milho/2008 (Figura 9d), sendo que esse efeito pode ser devido a que ainda em 2008 era recente o manejo mais criterioso com as ferramentas da AP na área, o que sugere que o NDVI também pode refletir o manejo adotado.

Figura 7 – Distribuição espacial (kg/ha) dos mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c)

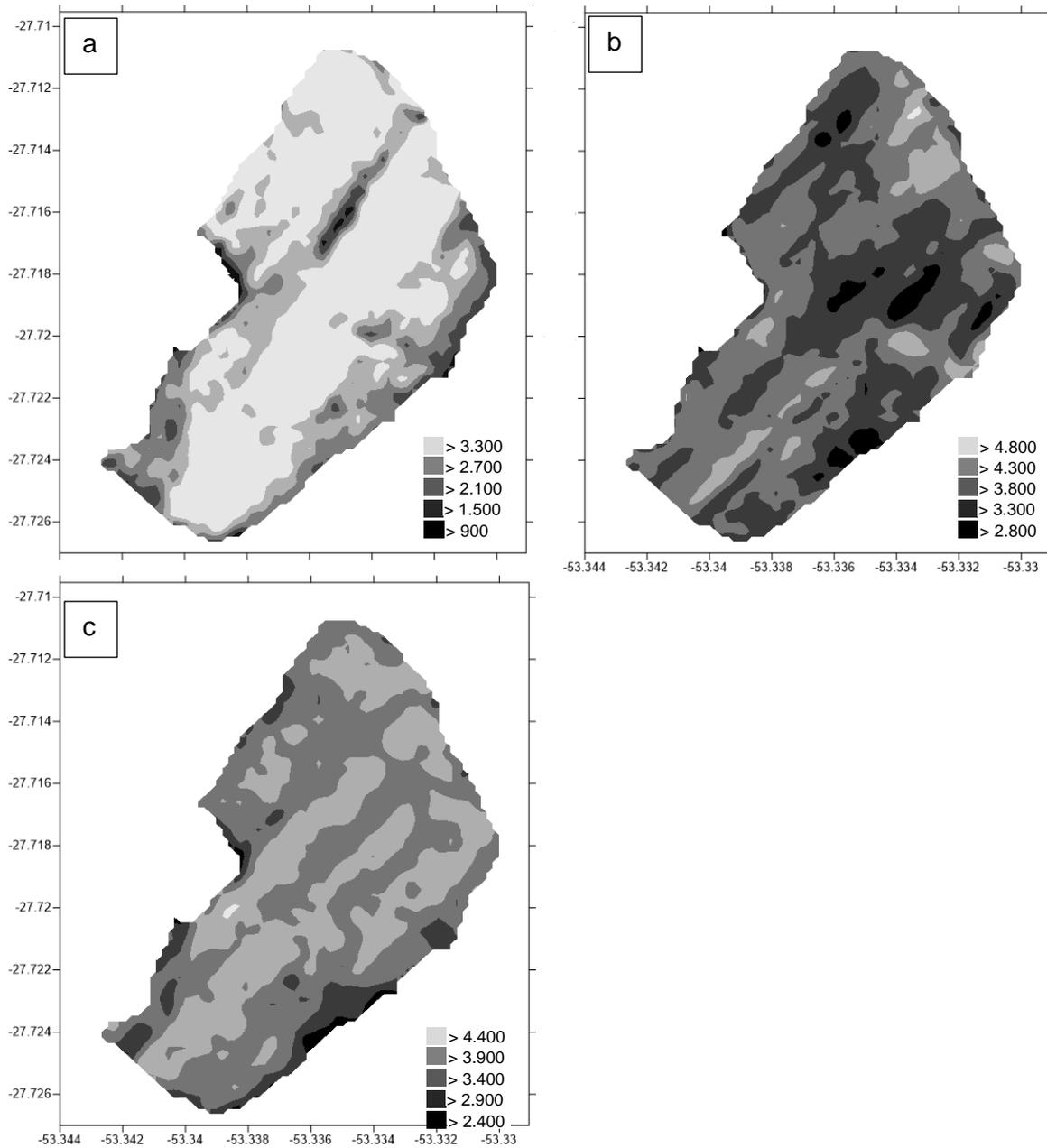


Figura 8 – Distribuição espacial do NDVI com referência da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b), Soja/2014 (c) e da média dos três cultivos (d)

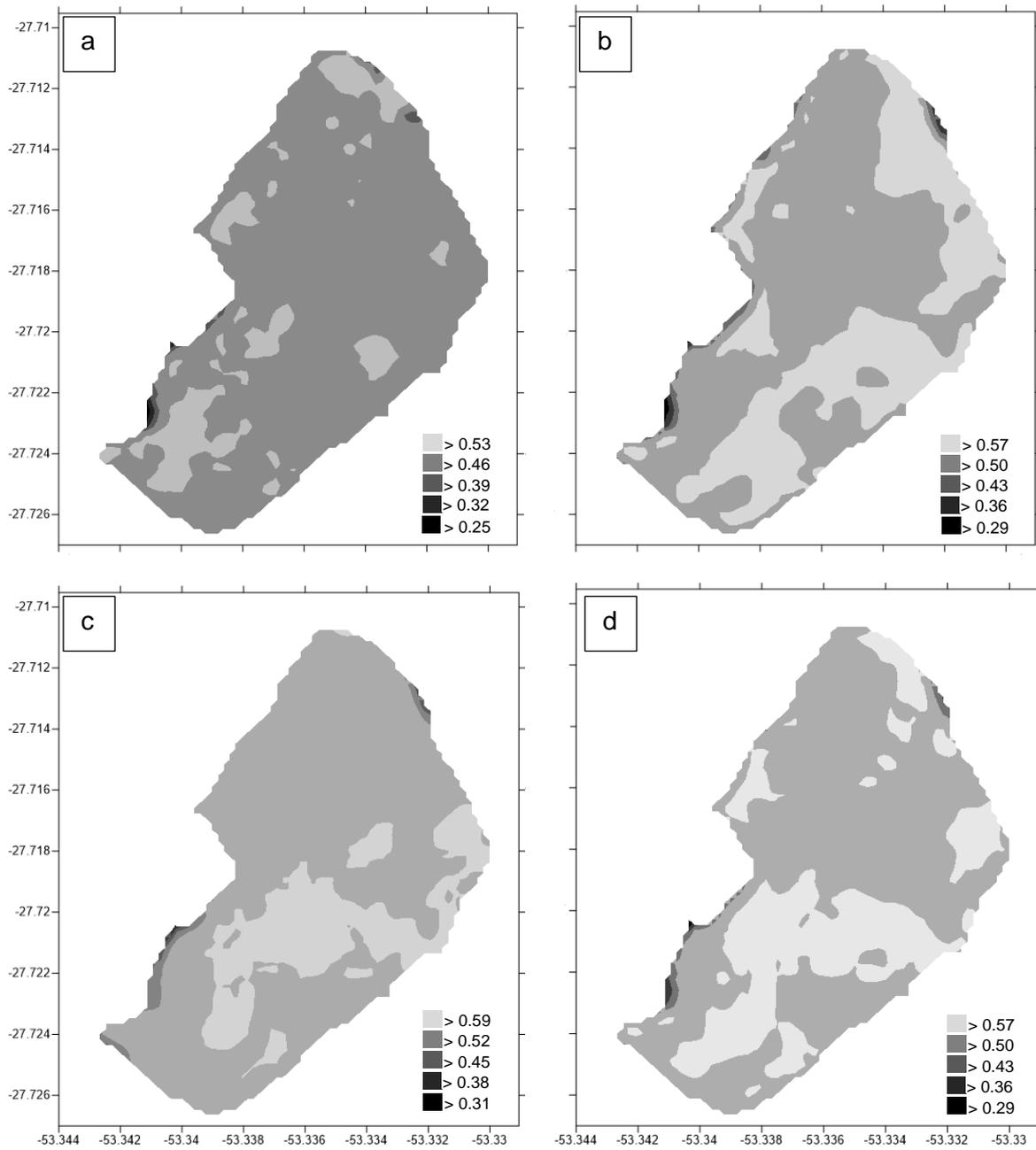
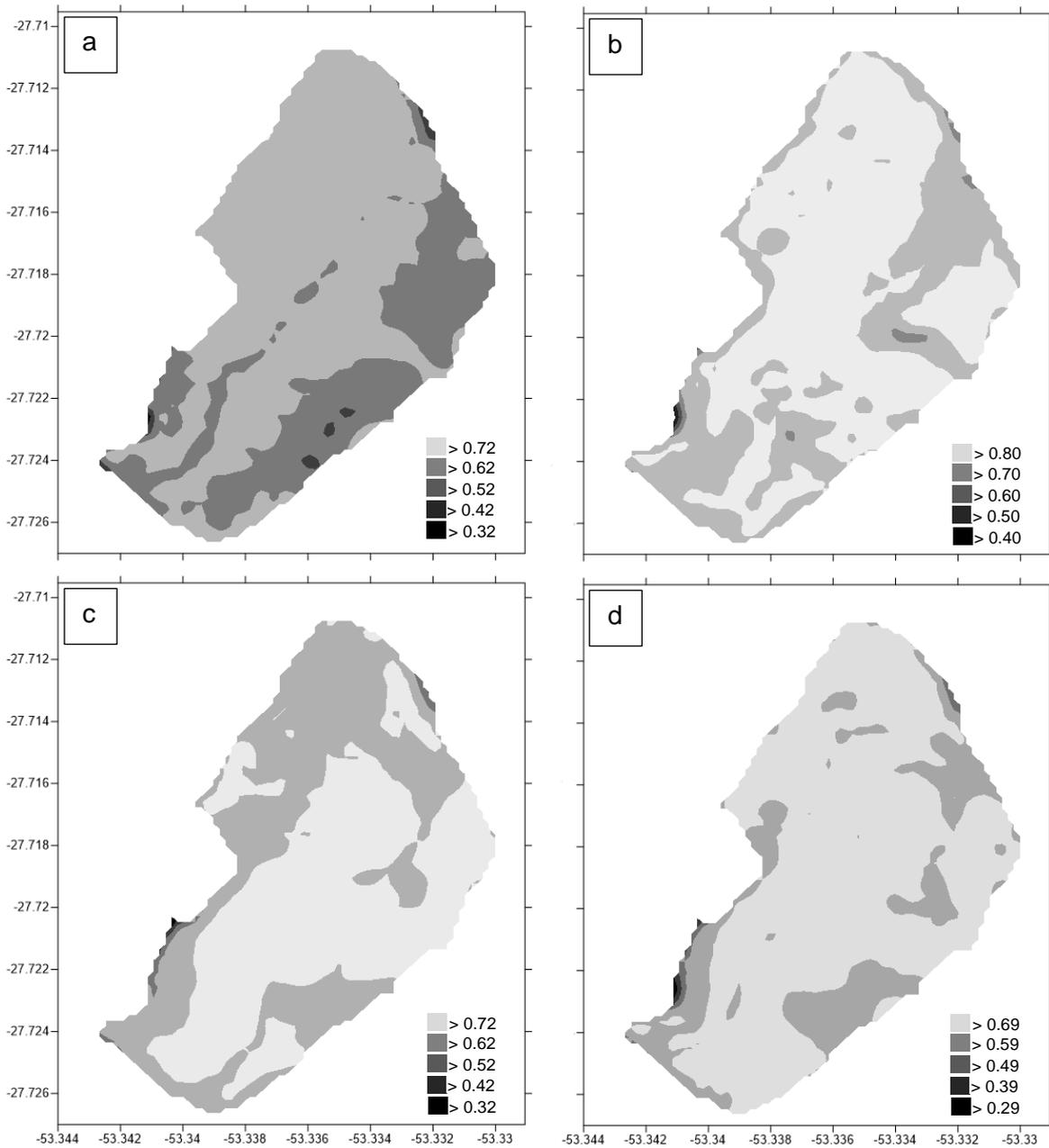
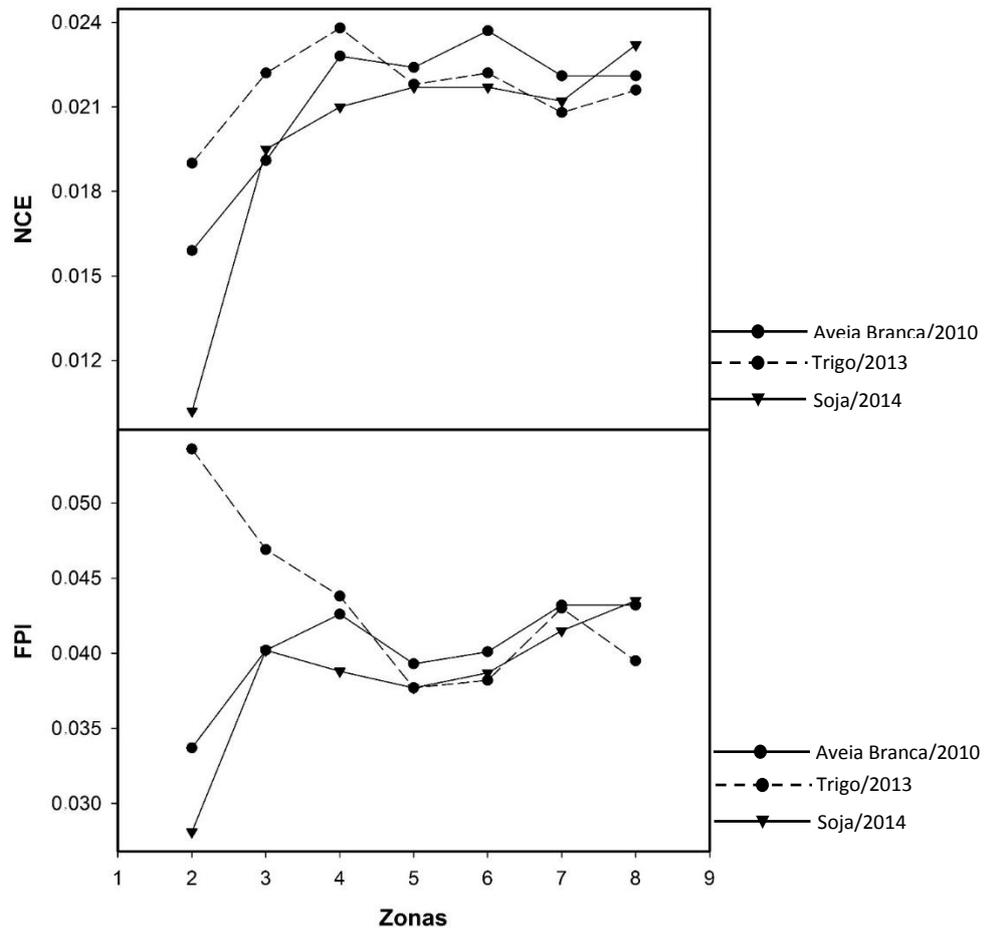


Figura 9 – Distribuição espacial do NDVI sem referência da Milho/2008 (a), Soja/2009 (b), Soja/2013 (c) e da média dos três cultivos (d)



Os resultados dos índices FPI e NCE para os mapas de rendimento frente as oito zonas de manejo testadas são apresentados na Figura 10. Nos três mapas de rendimento analisados para os dois índices testados, o comportamento em função das zonas de manejos testadas foram semelhantes, ou seja, seguiram um comportamento bem definido, sendo que apenas para o mapa de rendimento referente ao Trigo/2013 para o índice FPI constatou-se diferença deste com os demais mapas de rendimento para os dois índices.

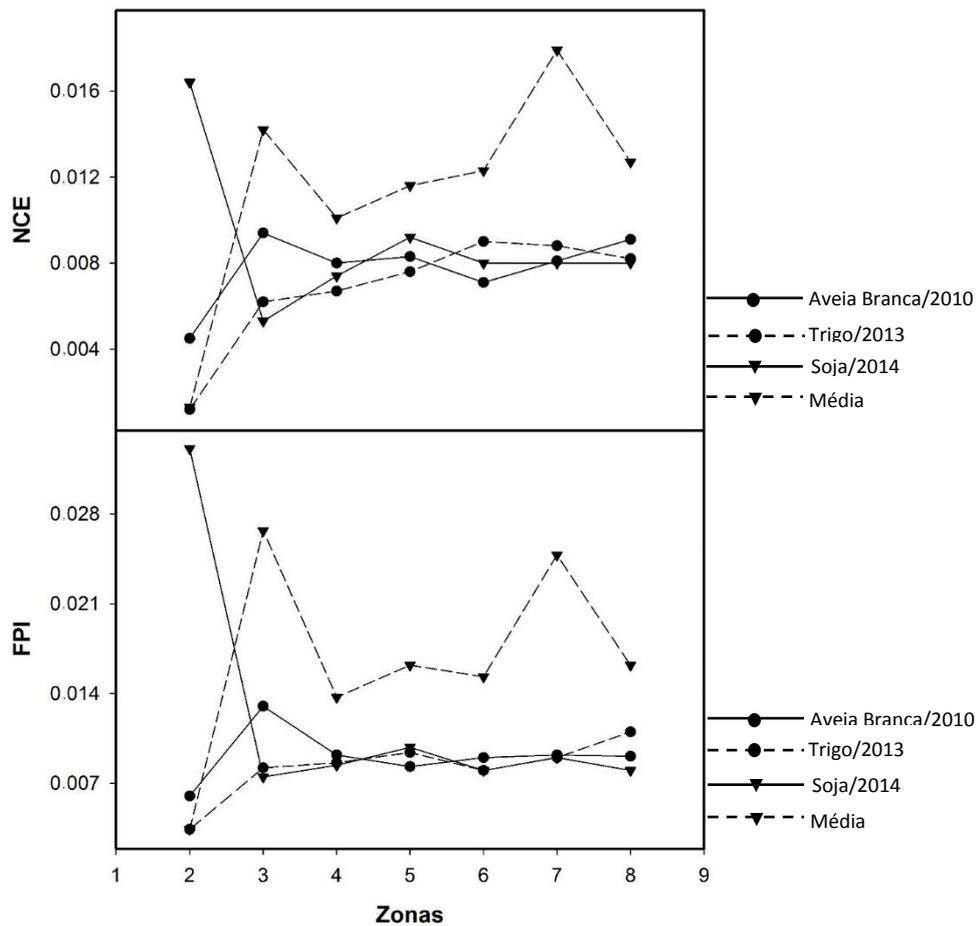
Figura 10 – Índice de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo software Management Zone Analyst para os mapas de rendimento



Segundo o critério adotado por Fridgen et al. (2004), os menores valores dos índices NCE e FPI resultam no número de zonas de manejo idônea, pois segundo os autores, há o menor compartilhamento de associação (FPI) ou maior quantidade de organização (NCE), no processo de agrupamento. Baseando-se nesse critério, nos dois índices testados, os resultados indicaram que entre as oito zonas de manejo testadas, duas zonas seriam o ideal para representar o conjunto dos três mapas de rendimento (Figura 10). Além disso, com exceção do mapa de rendimento de Trigo/2013, não observou-se melhoria significativa da FPI com um número de classes maior que duas, indicando que, aumentando os valores dos índices aumentaram com o número de agrupamentos e, por conseguinte, a variabilidade de dados também aumentou (CHIERICATI et al., 2007).

Assim como para os mapas de rendimento, o comportamento dos índices FPI e NCE para o NDVI com referência não apresentaram substanciais diferenças entre os cultivos (Figura 11).

Figura 11 – Índice de perfomance fuzzii (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para o com referência

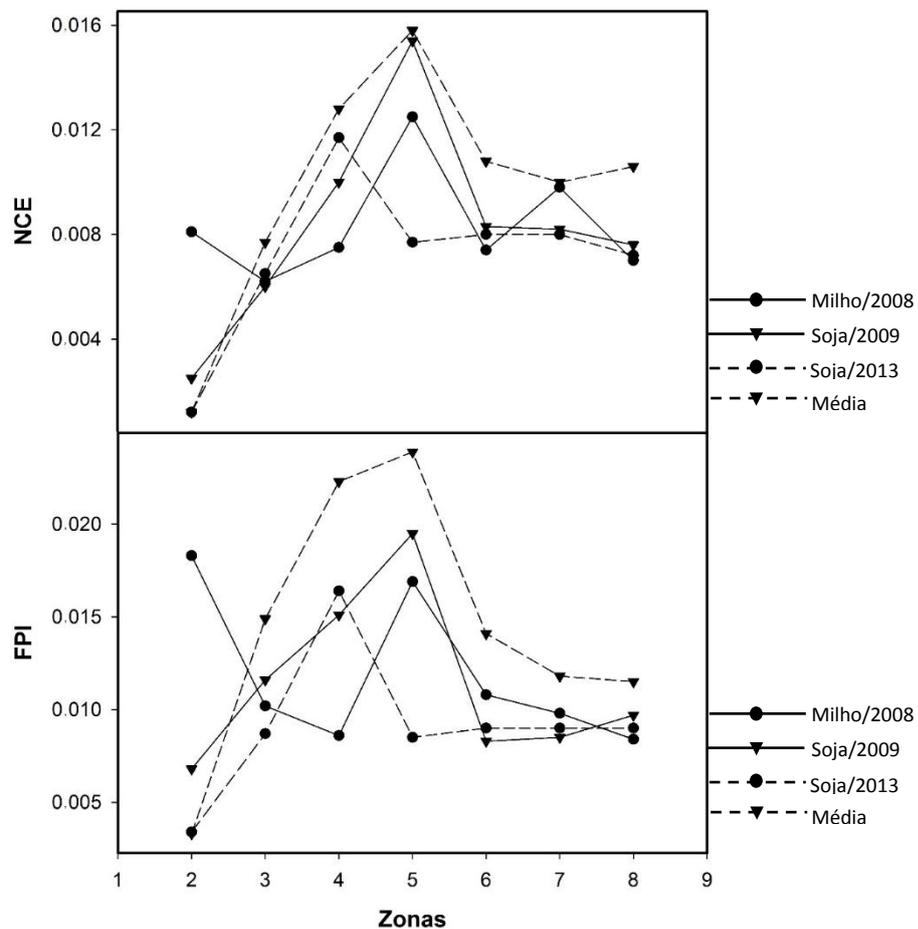


Entre as zonas de manejo para os dois índices testados, os resultados indicaram novamente que duas zonas de manejo seriam o ideal para representar os agrupamentos (Figura 11). Apenas para a Soja/2014 os resultados foram discrepantes, ou seja, houve melhoria nos índices NCE e FPI com o aumento do número agrupamentos. Fridgen et al. (2004), ressaltavam que em alguns casos, o comportamento das variáveis estudadas dentro de cada índice podem apresentar comportamento diferentes das demais, não sendo possível identificar o número de agrupamento idôneo, sendo que em casos extremos de discrepância a decisão final de quantas classes a ser utilizada depende de uma análise adicionais como, por exemplo, comparar zonas de manejo definidas com diferentes variáveis de entrada para determinar quais são as mais importantes (ALVES et al., 2013), ou definir o número de classes que seja representativo das demais variáveis como é o caso desse estudo.

No NDVI sem referência os resultados também apontaram para duas zonas de manejo como ideal para representar os agrupamentos (Figura 12). Apenas para o Milho/2008 o

número de zonas em que os índices NCE e FPI não foram mínimos não foi encontrado. Em todos os cultivos avaliados, com exceção do número de zonas de manejo correspondente a dois, houve grande variação nos resultados entre os índices, sendo que a partir de seis zonas de manejo os resultados tenderam a normalizar, o que indica que até seis agrupamentos seria o suficiente para representar a variação dos cultivos.

Figura 12 – Índice de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para o NDVI sem referência



Em geral, no comparativo dos resultados obtidos com os testes das oito zonas de manejo frente aos índices NCE e FPI nos mapas de rendimento (Figura 10), NDVI com referência (Figura 11) e NDVI sem referência (Figura 12), aponta-se para duas zonas de manejo para representá-los.

Com a definição das zonas de manejo para os mapas de rendimento (Figura 13), definiu-se duas zonas de manejo, sendo denominadas Zona 1, Zona 2, sendo que a partir da visualização da correspondência com mapas da distribuição espacial dos mapas rendimento,

as zonas definidas foram denominadas conforme Damian et al. (2016) em zona de alto potencial e zona de baixo potencial, respectivamente. Com a aplicação do algoritmo *fuzzy c-means* nos mapas de rendimento, pode-se observar melhor a distribuição das zonas que possuem maior tendência a apresentar maior resposta em rendimento, sendo que em geral as duas zonas, apresentaram pequenas variações, contudo foram semelhantes quanto a persistência nos cultivos.

O agrupamento em duas zonas para o NDVI com referência também observou-se similaridade com os agrupamentos do NDVI com referência (Figura 14). Para as zonas definidas para o NDVI sem referência, não foram observadas grandes diferenças em comparação ao mapa de distribuição espacial (Figura 15). Apenas observou-se que os resultados para o Milho/2008 e Soja/2009 apresentaram pequenas variações quando comparado aos mapas de Soja/2013 e da médias dos três cultivos, onde a Zona 1 estendeu-se a noroeste do mapa, porém essa variação foi considerada aceitável, visto que, houve correspondência quanto a distribuição dessa zona em todos os mapas.

Figura 13 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* para os mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c)

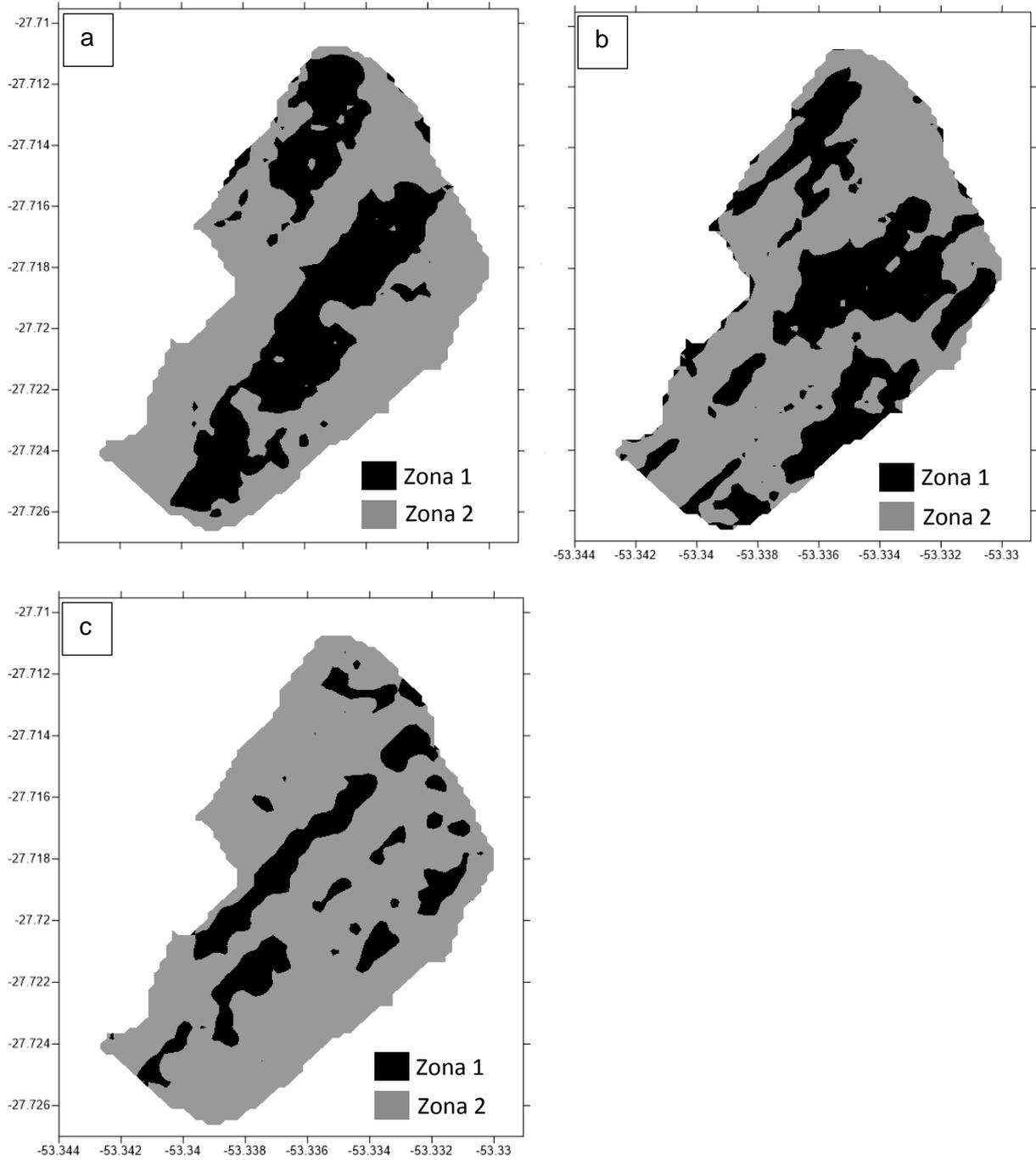


Figura 14 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* para o NDVI com referência da Aveia Branca/2010 (a), Trigo/2013 (b) e Soja/2014 (c) e da média dos três cultivos (d)

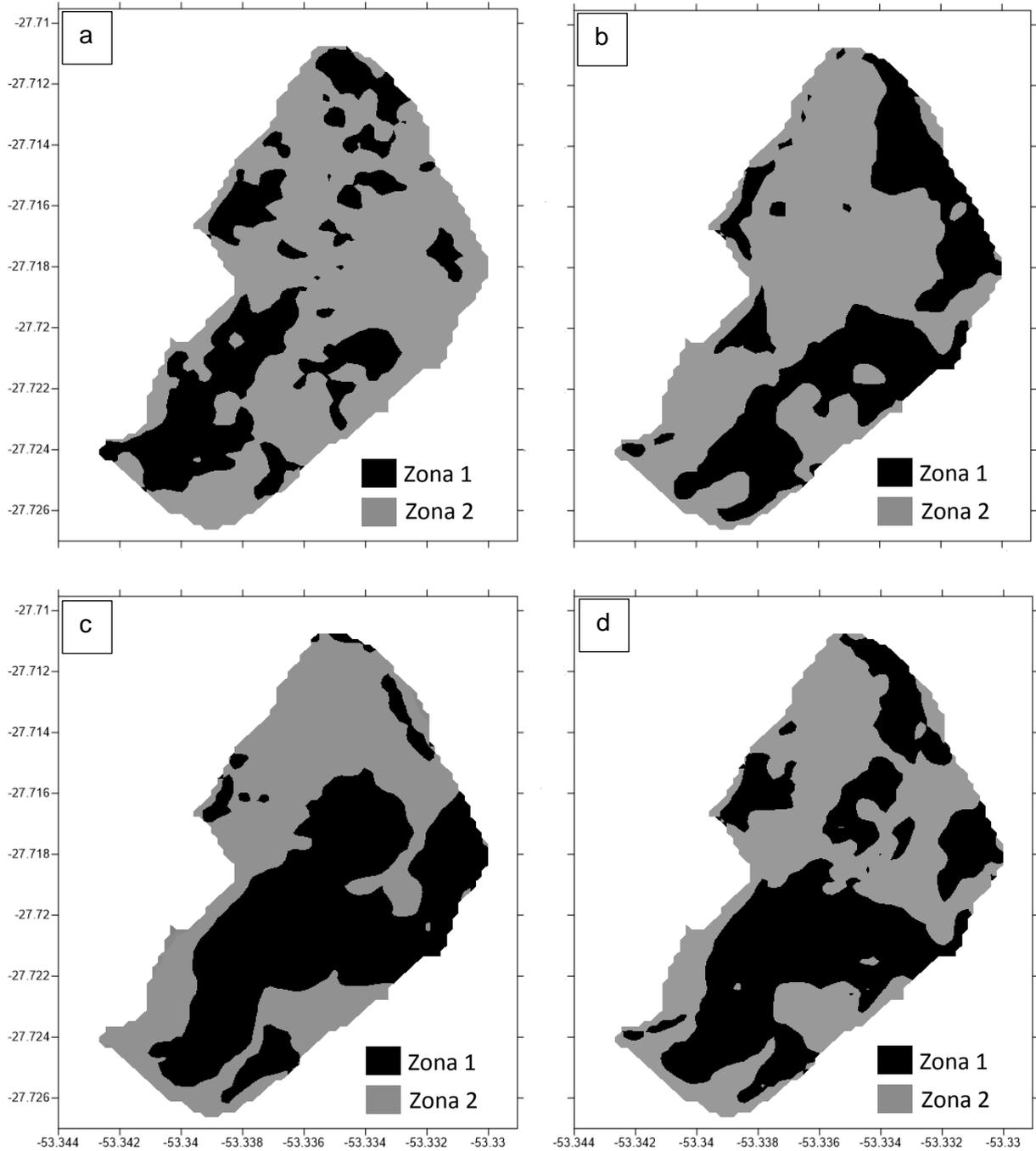
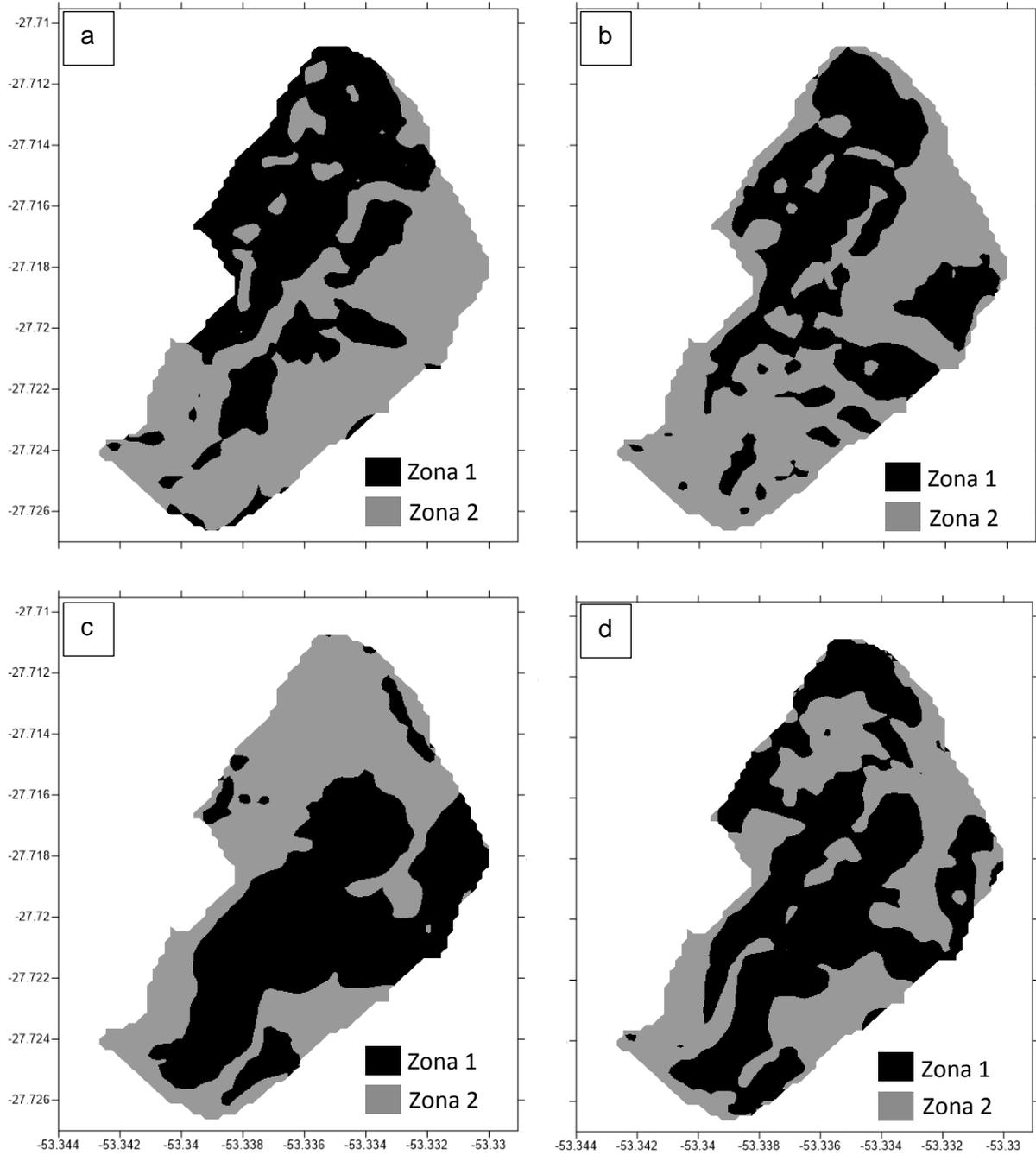


Figura 15 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* para o NDVI sem referência do Milho/2008 (a), Soja/2009 (b), Soja/2013 (c) e da média dos três cultivos (d)



Na comparação das médias de cada cultivo para os mapas de rendimento NDVI com referência e NDVI sem referência nas três zonas de manejo definidas, pode-se constatar se realmente as zonas de manejo definidas pelo método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* foram eficientes em expressar as diferenças entre as diferentes classes (Tabela 7).

Como uma avaliação geral, constatou-se as zonas definidas pelo método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* foram eficientes em diferenciar para os mapas de rendimento, as zonas de alto médio e baixo potencial de rendimento e para o NDVI com referência e NDVI sem referência os valores as zonas de alto médio e baixo potencial de NDVI. Nos mapas de rendimento apenas para a Aveia Branca/2010 não houve diferença significativa entre as zonas de alto e baixo potencial. No NDVI gerado pelas imagens de satélite, apenas para o NDVI sem referência, não foi observado diferença significativa entre as zonas de manejo, nesse caso, para a média dos três cultivos, onde as zonas de alto e baixo potencial de NDVI não apresentaram diferença significativa (Tabela 7).

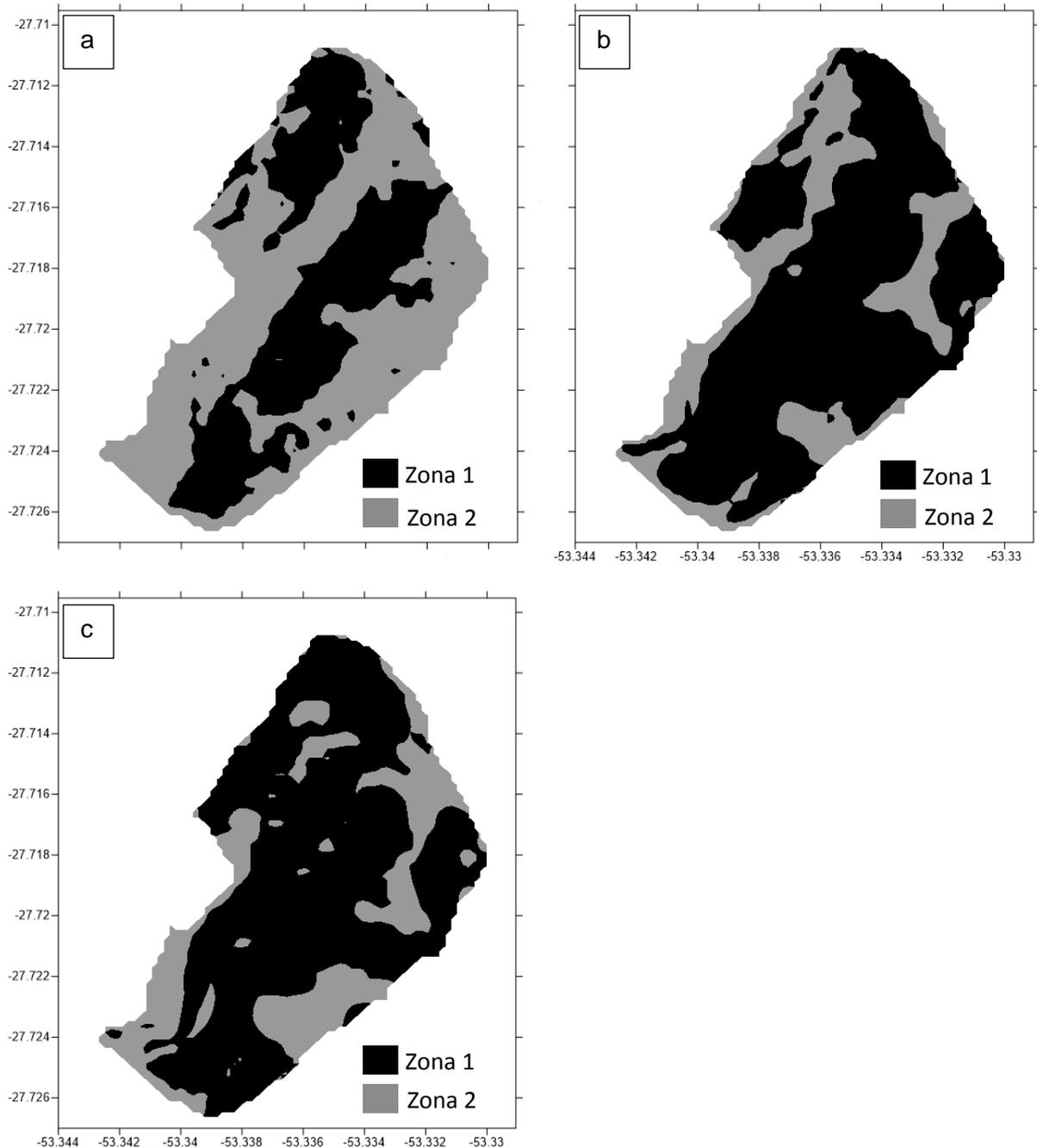
Tabela 7 – Comparação de médias dos diferentes cultivos referentes aos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência nas três zonas de manejo

Zonas	Mapas de rendimento			Média
	Aveia Branca/2010	Trigo/2013	Soja/2014	
Z1	2.654a*	3.961a	3.896 a	
Z2	2.094a	3.486b	3.268b	
Zonas	NDVI com referência			Média
	Aveia Branca/2010	Trigo/2013	Soja/2014	
Z1	0,42a	0,48a	0,52a	0,48a
Z2	0,36b	0,39b	0,46b	0,41b
Zonas	NDVI sem referência			Média
	Milho/2008	Soja/2009	Soja/2013	
Z1	0,62a	0,74a	0,52a	0,61a
Z2	0,58b	0,66b	0,48b	0,60a

* médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. ($p \leq 0,05$).

Os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência foram agrupados pelo algoritmo *fuzzy c-means* (Figura 16). Nas zonas geradas pelo agrupamento dos mapas de rendimento, observou-se que a zona de alto potencial (Zona 1) concentrou-se principalmente em uma faixa que se estende de norte a sul do mapa, com uma pequena parte a noroeste do mapa. Já a zona de baixo potencial (Zona 2) concentrou-se principalmente a oeste e sudoeste do mapa.

Figura 16 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* para os mapas de rendimento (a), NDVI com referência (b) e NDVI sem referência (c)



Nas zonas de manejo definidas com NDVI com referência observou-se que para a zona de alto potencial (Zona 1), houve a tendência da manutenção desta em uma faixa que se estende de norte a sul do mapa, assim como, nas zonas definidas com os mapas de rendimento (Figura 16). Na zona de baixo potencial (Zona 2), não houve grandes diferenças quanto a sua localização no mapa, ou seja, as mesmas se mantiveram a oeste e sudoeste.

As zonas de manejo definidas com o NDVI sem referência, foram semelhantes com as geradas com o NDVI com referência e em consequência com os mapas de rendimento (Figura 16c). Assim, como para o NDVI com referência, a zona de alto potencial (Zona 1) manteve-se principalmente em uma faixa que se estende de norte a sul do mapa, e a zona de baixo potencial (Zona 2), também concentraram-se a oeste, sudoeste do mapa.

Para comprovar a eficiência do algoritmo *fuzzy c-means* em delimitar as zonas de manejo, procedeu-se a comparação de médias entre todos os cultivos nos diferentes mapas de zonas de manejo definidos com a interpolação dos mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência (Tabela 8). Nas zonas de manejo geradas com interpolação dos mapas de rendimento, foi observada diferença significativa entre as duas zonas para praticamente todos os cultivos, sendo que apenas para NDVI sem referência da Soja/2013 não apresentou diferença significativa, onde as zonas de alto (Zona 1) e de baixo (Zona 2) potencial foram consideradas semelhantes.

Tabela 8 – Comparação de médias dos diferentes cultivos nas três zonas de manejo confeccionadas a partir da interpolação com algoritmo *fuzzy c-means* com os mapas de rendimento, NDVI com referência e NDVI sem referência

Zonas	Mapas de rendimento										
	MRAB10	MRT13	MRS14	RAB10	RT13	RS14	RM	SM08	SS09	SS13	SM
Z1	4.020a*	4.297a	3.986a	0,42a	0,48a	0,44a	0,47a	0,62a	0,73a	0,46a	0,65a
Z2	3.116b	3.252b	3.696b	0,36b	0,37b	0,39b	0,41b	0,56b	0,69b	0,29a	0,61b
NDVI com referência											
Z1	4.086a	4.187a	3.956a	0,43a	0,47a	0,52a	0,47a	0,74a	0,74a	0,54a	0,67a
Z2	3.199b	3.102b	3.596b	0,34b	0,40b	0,44b	0,33b	0,69a	0,52b	0,42b	0,51b
NDVI sem referência											
Z1	4.002a	4.497a	3.809a	0,43a	0,48a	0,52a	0,65a	0,62a	0,74a	0,52a	0,65a
Z2	3.504b	1.612b	2.521b	0,33b	0,45a	0,40b	0,61b	0,51b	0,51b	0,45b	0,55b

* médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de tukey a 5% de probabilidade de erro. ($p \leq 0,05$). Mapas de rendimento da Aveia Branca/2010 (MRAB10); mapa de rendimento do Trigo/2013 (MRT13); mapas de rendimento da Soja/2014 (MRS14); NDVI com referência da Aveia Branca (RAB10); NDVI com referência do Trigo/2013 (RT13); NDVI com referência da Soja/2014 (RS14); NDVI com referência da média dos três cultivos (RM); NDVI sem referência do Milho/2008 (SM08); NDVI sem referência da Soja/2009 (SS09); NDVI sem referência da Soja/2013 (SS13) e NDVI sem referência da média dos quatro cultivos (SM).

Para as zonas de manejo geradas com o NDVI com referência, apenas para o NDVI sem referência do Milho/2008 não foi observado diferença significativa (Tabela 8). Com isso, pode-se inferir que as zonas de manejo geradas a partir do NDVI de imagens de satélite, apresentam semelhante potencial em diferenciar as zonas de alto e baixo potencial quando comparados com as zonas de manejo geradas com os mapas de rendimento.

Assim como as zonas de manejo geradas com o NDVI com referência, para o NDVI sem referência, somente um cultivos não apresentou diferença significativa, sendo o NDVI com referência do Trigo/2013 (Tabela 8). Esses resultados indicam que as zonas de manejo delimitadas a partir de NDVI de series temporais, também são eficazes em diferenciar zonas com diferentes potencias produtivos.

2.6 CONCLUSÕES

Os mapas de rendimento apresentaram correlação de baixa a média com o NDVI relativo a cada cultivo e com o NDVI de diferentes cultivos.

O algoritmo *fuzzy c-means*, foi eficiente em delimitar zonas de manejo a partir dos mapas de rendimento e com NDVI relativo a cada cultivo e de NDVI de diferentes cultivos.

O NDVI foi um bom parâmetro para delimitar duas zonas de manejo de alto e baixo potencial.

2.7 AGRADECIMENTOS

A empresas GEAGRO e PLANTEC e ao engenheiro agrônomo Fabiano Paganella pelo auxilio na elaboração do projeto de estudo e durante o seu processamento e ao grupo Schaedler em nome de Eduardo Dauve e também de Eliseu José Schaedler pela área de estudo e os auxílios prestados durante os períodos de trabalho.

2.8 REFERENCAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, S. M. F. et al. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.

ARSLAN, S.; COLVIN, T. S. Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 3, p. 135-154, 2002.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geostatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso**. 2004. 158 p. Tese (Doutorado em Água e Solo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

BEZDEK, J. C. **Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**. Norwell: Kluwer: Academic Publishers, 1981. 256p.

BOKEN, V. K.; SHAYKEWICH, C. F. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based normalized difference vegetation index. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 20, p. 4155-68, 2002.

BULLOCK, D. S.; KITCHEN, N.; BULLOCK, D. G. Multidisciplinary teams: A necessity for research in precision agriculture systems. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 5, p. 1765-1769, 2007.

BLACKMORE, S.; MOORE, M. Remedial correction of yield map data. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 1, p. 53-66, 1999.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 92, p. 79-97, 2014.

CHIERICATI, M. Delineating management zones to apply site-specific irrigation in the Venice lagoon watershed. In: STAFFORD, J. V. ed. **Precision Agriculture '07 – Proceedings of the Sixth European Conference on Precision Agriculture (6ECPA)**. Skiathos, Greece, 2007. p. 599-605.

CHANG, D. et al. Delineation of management zones using an active canopy sensor for a tobacco field. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 109, p. 172-178.

DAMIAN, J. M. et al. Delineating management zones for precision agriculture applications: a case study on wheat in sub-tropical Brazil. **Italian Journal of Agronomy**, v. 11, n. 3, p. 171-179, 2016.

EITELWEIN, M. T. **Definição de estabilidade produtiva e relação com atributos de solo em áreas manejadas com Agricultura de Precisão**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

EL NAHRY, A. H.; ALI, R. R.; EL BAROUDY, A. A. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 517-531, 2011.

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. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 44, n. 1, p. 155-166, 2001.

FRIDGEN, J. J. et al. Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GIOTTO, E.; ROBAINA, A. D. **A agricultura de precisão com o CR Campeiro 7**. Manual do usuário. Santa Maria: UFSM/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Rural/Laboratório de Geomática, 2007. 319p.

GROTEN, S.M.E. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 14, n. 8, p. 1495-1515, 1993.

HMIMINA, G. et al. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v. 132, p. 145-158, 2013.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JOHNSON, C. K. et al. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 303–315, 2003.

JL, L. et al. Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 96, p. 20-27, 2014.

LI, Y. et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 56, p. 174-186, 2007.

LIN, M. L. et al. Fuzzy model-based assessment and monitoring of desertification using MODIS satellite imagery. **Engineering Computations**, v. 26, n. 7, p. 745-760, 2009.

LOPRESTI, M. F.; DI BELLA, C. M.; DEGIOANNI, A. J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Processing in Agriculture**, Beijing, v. 2, p. 73–84, 2015.

LEE, W.; EHSANI, R. Sensing systems for precision agriculture in Florida. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 112, p. 2-9, 2015.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 367-374, 2003.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied Linear Statistical Methods**. 2. ed. Illinois: Irwin Professional Publishing, 1985. 1152p.

ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 2, p. 505-516, 1992.

OMUTO, C. T. A new approach for using time-series remote-sensing images to detect changes in vegetation cover and composition in drylands: a case study of eastern Kenya. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 32, n. 21, p. 6025–6045, 2011,

PASSARI, L. M. G. Z. et al. Estatística aplicada à química: dez dúvidas comuns. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 888-892, 2011.

PERALTA, N. R. et al. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, p. 1-16, 2016.

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Versão 5.03. Beta, Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E. **How a soybean plant develops**. Ames, Yowa: Yowa State University of Science and Technology, 1982. 20 p. (Special Report, n. 53).

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Ames, Yowa: Yowa State University of Science and Technology, 1993. 24p. (Special Report, n. 48).

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: Third ERTS Symposium. NASA, p. 309-317, 1973.

SRBINOVSKA, M. et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 88, p. 297-307, 2015.

SHAW, R. et al. Characterising the within-field scale spatial variation of nitrogen in a grassland soil to inform the efficient design of in-situ nitrogen sensor networks for precision agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 230, p. 294-306.

SANTI, A. L. et al. Soil physical and hydraulic changes in different yielding zones under no-tillage in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 11, n. 15, p.1326-1335, 2016.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SULTANA, S. R. et al. Normalized Difference Vegetation Index as a Tool for Wheat Yield Estimation: A Case Study from Faisalabad, Pakistan. **The Scientific World Journal**, Cairo, v. 14, p. 1-8, 2014.

SHIRATSUCHI, L. S. **Conceitos e considerações práticas do sistema de geração de mapas de produtividade na cultura de grãos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 27p. (Documentos, 126).

TAGARAKIS, A. et al. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 14, p. 18-39, 2013.

TARNAVSKY, E.; GARRIGUES, S.; BROWN, M. E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v. 112, p. 535-549, 2008.

TUCKER, C. J. et al. Relationship of spectral data to grain yield variation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Washington, v. 46, p. 657-666, 1980.

USGS-UNITED STATES OF GEOLOGICAL SURVEY. **Department of the Interior U.S. Geological Survey**. Reston, 2016. Disponível em:<<http://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

UNGARO, F.; ZASADAB, I.; PIORR, A. Turning points of ecological resilience: Geostatistical modelling of landscape change and bird habitat provision. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 157, p. 297-308, 2017.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, 352p. p. 1-54.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2007. 330p.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds). **Pedogenesis and Soil Taxonomy - I**. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, p.83-116, 1983.

YANG, Y. et al. The spatial continuity study of NDVI based on Kriging and BPNN algorithm. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam v. 54, p. 1138-1144, 2011.

ZHANG, X. et al. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 11, p. 103–114, 2010.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, p. 415-421, 1974.

3 ARTIGO II – VARIABILIDADE CAUSADA PELA CULTURA DE COBERTURA DE INVERNO NA CULTURA DE VERÃO EM SUCESSÃO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

3.1 RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da variabilidade causada pela matéria seca e a ciclagem de nutrientes da cobertura de cobertura de inverno na cultura de verão em sucessão, por meio do índice de NDVI calculado por um sensor portátil “por terra” e com um RPAS. O estudo foi conduzido em área de Latossolo Vermelho com 73,96 ha, localizada no município de Boa Vista das Missões – RS, Brasil. Após a área ser georreferenciada e posteriormente dividida em uma malha amostral de 70,71 x 70,71 m (0,5 ha), que resultou em 147 pontos amostrais, onde realizou-se a amostragem de solo para a análise química e as avaliações de matéria seca e os nutrientes acumulados na cultura de cobertura inverno da aveia preta. Sob a cultura da aveia preta, foi semeado, no verão, a cultura da soja, na qual nos estágios R5 e R5.5 foram realizadas avaliações com um sensor portátil “por terra” e com um RPAS para a obtenção do índice de NDVI. Por fim determinou-se o rendimento de grãos da soja, bem como, a população final de plantas. As variáveis foram submetidas a análises de estatística descritiva, matriz de correlação de Spearman, regressão múltipla de Stepwise, análise de trilha e geoestatística. Delimitou-se também zonas de manejo por dois métodos sendo o primeiro pelos componentes principais e o segundo pelo a partir do algoritmo *fuzzy c-means*. Com os resultados observou-se que há influência da planta de cobertura de inverno na cultura de verão, em que nesse estudo, a variabilidade da massa seca da aveia preta, assim como, os nutrientes acumulados referentes ao nitrogênio e o magnésio, apresentaram as maiores influencias no rendimento de grãos da soja e o NDVI avaliado no estágio R5 da soja seja “por terra” ou com o RPAS, foram eficazes em expressar essa variabilidade. Dos atributos químicos do solo avaliados, a matéria orgânica foi a que mais influenciou o rendimento da soja. O método realizado pelo algoritmo *fuzzy c-means*, foi mais eficaz na confecção das zonas de manejo que o método dos componentes principais.

PALAVRAS-CHAVE: NDVI, Sensor portátil, Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, *Avena strigosa*, *Glycine max*.

3.2 ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of dry matter variability and nutrient cycling of the winter cover crop in the summer crop, using the NDVI index calculated by a portable sensor “by land” and with a RPAS. The study was conducted in Oxisol with 73.96 ha located in Boa Vista das Missões - RS, Brazil. After being georeferenced and later divided into a sampling grid of 70.71 x 70.71 m (0.5 ha) which resulted in 147 sampling points, where soil sampling for chemical analysis and dry matter and nutrient accumulation evaluations were carried out in the winter cover crop of black oats. Under the black oat crop, the soybean crop was sown in the summer, in which R5 and R5.5 stages were performed with portable sensor "by land" and with a RPAS to obtain the NDVI index. At the end, soybean yield was determined, as well as the final population of plants. The variables were submitted to descriptive statistics analysis, Spearman correlation matrix, Stepwise multiple regression, path analysis and geostatistics. It was also delimited management zones by two methods, the first by the principal component analysis and the second by the fuzzy algorithm c-means. With the results it was observed that there is influence of the winter cover plant in the summer crop, Where in this study, the dry matter variability of black oats, as well as the accumulated nutrients for nitrogen and magnesium, presented the highest Influences on soybean grain yield and NDVI evaluated at the soybean R5 stage either "by land" or with RPAS, were effective in expressing this variability. From the chemical attributes of the soil evaluated, the organic matter was the one that most influenced the soybean yield. The method developed by the fuzzy algorithm c-means was more effective in configuring management zones than the main principal component analysis.

KEYWORDS: NDVI, Portable sensor, *Remotely Piloted Aircraft Systems*, *Avena strigosa*, *Glycine max*.

3.3 INTRODUÇÃO

A mensuração da variabilidade de diferentes parâmetros referentes ao solo, culturas e ao ambiente de produção sempre foram o objetivo de estudo nas mais diferentes áreas do conhecimento de ciência agrícola, sendo que, a utilização de novas tecnologias forneceram as ferramentas para a manejar e compreender essa variabilidade (JONES et al., 2015; FU et al., 2016).

No Brasil, o Sistema Plantio Direto (SPD) representou e ainda representa a principal inovação na agricultura, em que todo o sistema de produção brasileiro foi modificado buscando atender as práticas conservacionistas desse sistema. De acordo com Cerri et al. (2009) o SPD é um sistema de cultivo pelo qual o solo é revolvido somente na linha de semeadura onde uns dos principais interesses refere-se a cobertura do solo com culturas idôneas ou resíduos de cultura da colheita anterior que são deixados na superfície. Nesse sentido, a adoção do SPD culminou em inúmeros estudos que buscaram mensurar o efeito das culturas de cobertura em esquemas de rotação em SPD, em que os resultados apontam para benefícios que abrangem a qualidade física (COSTA et al., 2011; KONDO et al., 2012), química (TORRES e PEREIRA, 2008; BRESSAN et al., 2013) e biológica do solo (SANTOS et al., 2008; CUNHA et al., 2012), além do benefícios ambientais no que tange menor uso de fertilizantes minerais (BOER et al., 2007; CRUSCIOL e SORATTO, 2009) e redução do carbono no ambiente (AMADO et al., 2001; CARVALHO et al., 2014). Contudo, apesar dos inúmeros benefícios que as culturas de cobertura proporcionam a nível de sistema de produção agrícola, essas se tornaram mais um fator de variabilidade que necessitou-se levar em consideração no manejo em SPD. Teixeira et al. (2016) em estudos com culturas de cobertura, indicam que as mesmas afetam a dinâmica do N no solo, onde a época de semeadura e o N remanescente no solo são os principais fatores que influenciaram na variabilidade.

Normalmente, o manejo da adubação é realizado segundo a amostragem de solo, com a avaliação dos atributos químicos do mesmo, porém, como já discutido, os resíduos culturais, principalmente oriundos de culturas de cobertura, podem ser uma fonte de variabilidade no solo que não é levado em consideração no processo de adubação. Nesse enfoque, a utilização de tecnologias pode ser de grande valia para avaliar a variabilidade causadas pelas culturas de cobertura na cultura de verão. Baseado nisso, o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pode ser uma alternativa para esta finalidade, pois o mesmo apresenta correlação com o rendimento das culturas (BOKEN e SHAYKEWICH, 2002; SULTANA et al., 2014; LOPRESTI et al., 2015; PERALTA et al., 2016), além de ser um indicador de inúmeras outras anomalias que podem indicar a variabilidade causada pelas culturas de cobertura. O NDVI pode ser utilizado por meio de sensores portáteis, embarcados em máquinas, oriundos de imagens de satélites (TARNAVSKY et al., 2008), e mais recentemente através de sensores embarcados nos chamados RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems).

Os RPAS destacam-se como mais recentes tecnologias empregadas na agricultura. Contudo, apesar disso, despontou como sendo uma das principais inovações na agricultura a serem utilizadas em rápido ascensão, sendo tema de várias pesquisas que estão sendo

realizadas mundialmente, em que em alguns trabalhos já mostram o potencial de uso na agricultura com essa tecnologia, como é o caso em estudos com controle de invasoras (GRANADOS et al., 2015), doenças (CALDERÓN et al., 2014) e manejo de irrigação (DUGO et al., 2013; BELLVERT et al., 2014).

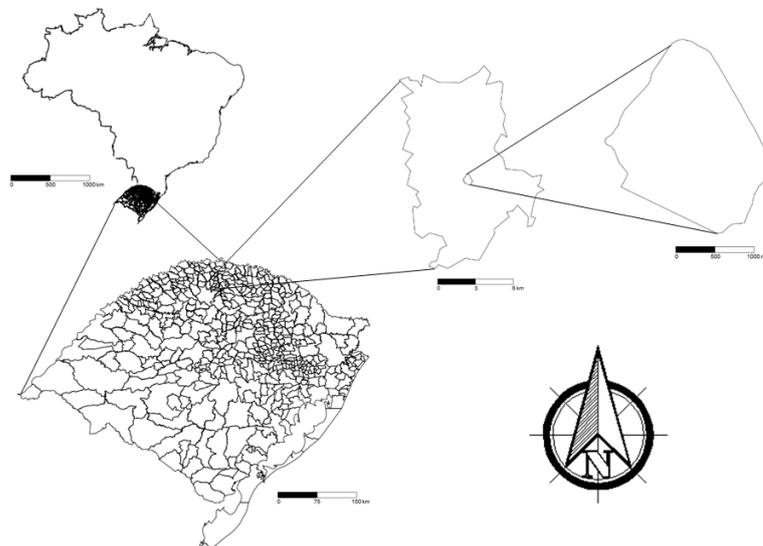
A utilização de metodologias que busquem mensurar, compreender e manejar a variabilidade que os resíduos oriundos de culturas de cobertura de inverno causam na cultura principal no verão pode representar um grande avanço na gestão de um sistema complexo como o SPD, principalmente com o emprego de índices de vegetação, como é o caso do NDVI. Baseado nisso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da variabilidade da cultura de cobertura do solo cultivada no inverno sob a variabilidade da cultura de verão, por meio do NDVI calculado por um sensor portátil “por terra” e com um RPAS.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área irrigada sob sistema de pivô central localizada no município de Boa Vista das Missões, Rio Grande do Sul (RS), Brasil, situada entre as coordenadas de latitude: 27°42'38" S a 27°43'10" S e longitude: 53°20'04" O a 53°20'19" O, totalizando uma área cultivada de 73,96 ha (Figura 1). O clima da região é subtropical úmido com verão quente, tipo Cfa, com máximas iguais ou superiores a 22°C, mínimas entre -3 a 18°C e precipitação média anual entre 1.900 e 2.200 mm (ALVARES et al., 2013).

Figura 1 – Localização geográfica da área experimentais utilizadas no estudo



O relevo da região é suave ondulado e o solo presente na área experimental, é classificado como Latossolo Vermelho (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa. O manejo utilizado na área inclui a adoção do sistema plantio direto (SPD) a mais de 20 anos e a utilização de ferramentas de AP, como amostragem georreferenciada de solo e monitoramento georreferenciado da colheita. O histórico de cultivos e do manejo de adubações na área estudada é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico de cultivos e do manejo de correções e adubações na área estudada entre os anos de 2008 a 2015

Ano	Período	Cultura	Adubação	Quantidade	Aplicação
2008	Inverno	Aveia Preta	**	**	**
	Verão	Milho	11.52.00	180 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
			30.00.20	280 kg ha ⁻¹	Cobertura
2009	Inverno	Aveia Branca	11.52.00	120 kg ha ⁻¹	Base
	Verão	Soja	45.00.00	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
			02.25.15	300 kg ha ⁻¹	Base
2010	Inverno	Aveia Branca	05.20.20	90 kg ha ⁻¹	Base
	Verão	Milho	18.46.00	150 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
			45.00.00	160 kg ha ⁻¹	Cobertura
2011	Inverno	Aveia Preta	**	**	**
	Verão	Soja	18.46.00	120 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
2012	Inverno	Aveia Branca	**	**	**
	Verão	Milho	18.46.00	140 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	130 kg ha ⁻¹	Cobertura
			45.00.00	200 kg ha ⁻¹	Cobertura
2013	Inverno	Trigo	18.46.00	110 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	100 kg ha ⁻¹	Cobertura
			45.00.00	200 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Soja	11.52.00	140 kg ha ⁻¹	Base
2014	Inverno	Aveia Preta	00.00.60	130 kg ha ⁻¹	Cobertura
			01.18.00	300 kg ha ⁻¹	Base
	Verão	Soja	11.52.00	150 kg ha ⁻¹	Base
2015	Inverno	Aveia Preta	00.00.60	200 kg ha ⁻¹	Cobertura
			00.00.60	200 kg ha ⁻¹	Cobertura
	Verão	Soja	11.52.00	180 kg ha ⁻¹	Base
			00.00.60	170 kg ha ⁻¹	Cobertura

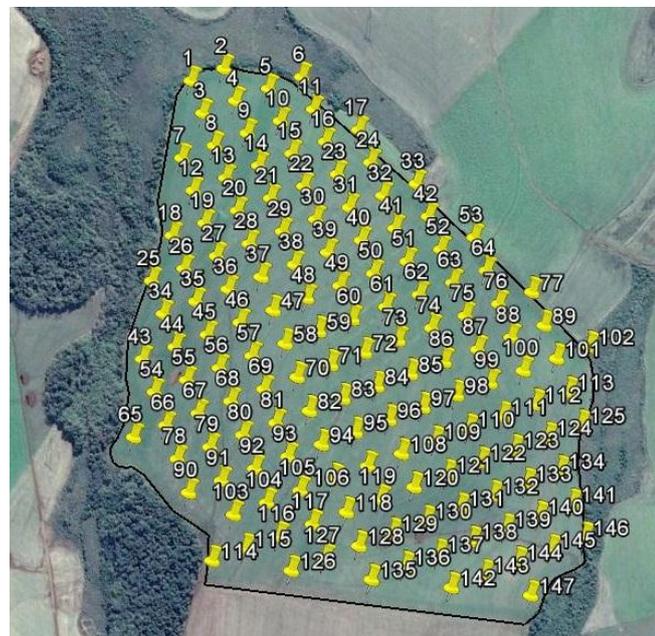
** Sem Adubação

Fonte: Dados cedidos pelo proprietário da área.

Plano de amostragem de solo e de plantas

A área foi georreferenciada através de um GPS Garmin® Legend (Garmin International, Inc., Olathe, KS, USA). Após isso, estabeleceu-se uma malha de amostragem com tamanho de célula de 70,71 x 70,71 m (0,5 ha) na área por meio do software CR-Campeiro 7 (GIOTTO e ROBAINA, 2007), que interpola, para cada pixel, uma coordenada central baseada no tamanho da grade, o que resultou em 147 pontos de amostragem (Figura 1).

Figura 2 – Distribuição dos pontos utilizados para as avaliações dos atributos de solo e plantas na área segundo a malha de 70,71 x 70,71 m



Atributos de solo e de plantas

A amostragem do solo para análise química foi realizada nos 147 pontos georreferenciados após a colheita da cultura do milho e anteriormente a semeadura da cultura de cobertura de inverno, no dia 15/04/2015. As amostras foram coletadas com um quadriciclo equipado com trado de rosca impulsionado por acionamento hidráulico, em uma profundidade de 0,00 – 0,10 m. Em cada célula de amostragem em um raio de 10 m do ponto central de cada célula, foram coletadas 14 subamostras para compor uma amostra composta. Após a coleta, as amostras foram identificadas e encaminhadas para o Laboratório de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde se determinou os teores de matéria orgânica

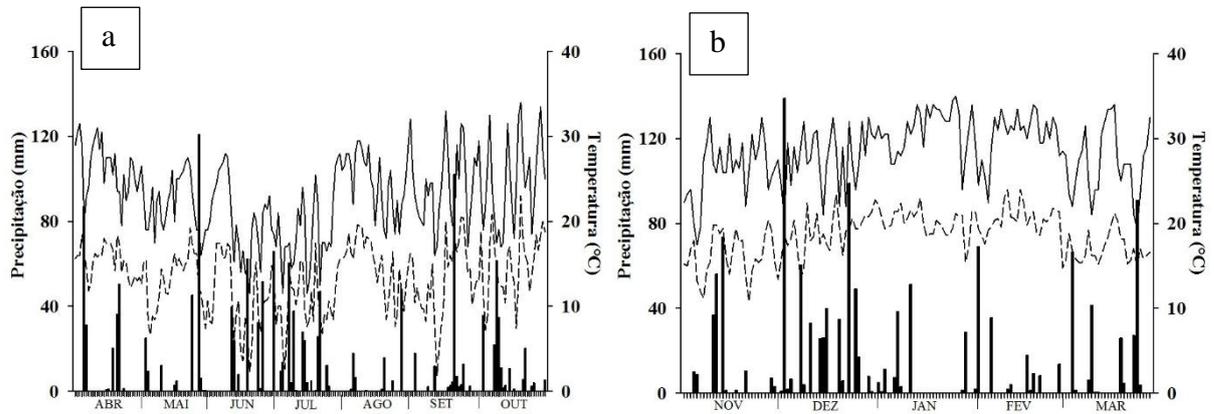
do solo (MOS), pH em água (1:1), teores disponíveis de P e K extraídos pela solução Mehlich⁻¹, Ca e Mg extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, acidez trocável (Al) e potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m). Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995) e recomendadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (COMISSÃO..., 2016).

Nos mesmos pontos georreferenciados de amostragem de solo, procedeu-se a coleta de massa seca da cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), quando estava na maturação fisiológica. A semeadura da aveia preta foi realizada no dia 29/04/2015 e a coleta no dia 29/10/2015 (Figura 3a), na qual utilizou-se um quadro de 0,25 m², sendo feitas três repetições por ponto amostral. Posteriormente as amostras foram conduzidas para o Laboratório de Análise de Tecido Vegetal da Universidade Federal de Santa Maria, campus de Frederico Westphalen e colocadas em estufa à temperatura de 65°C até atingir massa constante, sendo então, aferidas em balança com precisão de 0,01 g e os valores foram extrapolados para kg ha⁻¹. De posse das amostras secas, estas foram moídas em moinho tipo “Willey” com peneira com malha de 1,0 mm. No material seco e moído, foram extraídos o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por meio de digestão com H₂SO₄ concentrado. O N foi quantificado por destilação (semi-micro Kjeldahl) e titulação com ácido sulfúrico, o P por espectrofotometria, o K por fotometria de chamas e o Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica, conforme metodologias descritas em Silva (2009). O C foi quantificado pelo método Walkley-Black, descrito em Tedesco et al. (1995).

Após o manejo da aveia preta, foi semeada no dia 16/11/2015 a cultura da soja com a cultivar NS 5445, com 220.000 sementes/ha e espaçamento de 0,5 m entre linhas. Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com Fludioxonil + Metalaxyl – M na dose de 100 mL 100kg⁻¹ de sementes (fungicida) e Thiametoxan na dose de 200mL 100kg⁻¹ de sementes (inseticida). No estágio R7 (início da maturação) da cultura da soja, determinou-se a população de plantas nos 147 pontos de amostragem com três repetições por ponto amostral, sendo que, para isso, contabilizou-se o número de plantas em cinco metros lineares em três fileiras de semeadura (7,5 m²).

A colheita da soja foi realizada manualmente no dia 15/03/2016 (Figura 3b), onde coletou-se nos 147 pontos anteriormente definidos, cinco metros lineares em três fileiras de semeadura (5 x 1,5 m). As plantas colhidas foram posteriormente trilhadas para a quantificação do rendimento de grãos, o qual foi corrigido para 13% de umidade e quantificado em kg ha⁻¹.

Figura 3 – Temperatura diária mínima (---) e máxima (—) e precipitação diária (■), durante o ciclo da cultura da aveia preta (a) e da soja (b)



Avaliação do índice NDVI

O índice NDVI foi utilizado para verificar o efeito da variação dos atributos químicos do solo, do rendimento de massa seca e dos nutrientes ciclados da cultura de cobertura de inverno (aveia preta) sob a cultura de verão (soja). O NDVI foi avaliado por meio de dois métodos, sendo que para um deles utilizou-se o sistema de aeronave remotamente pilotada (RPAS) e outro por meio de leituras terrestres com o GreenSeeker.

Com o RPAS, procurou-se realizar os voos somente em dias ensolarados com o céu sem nuvens entre 12 e 14h. A aeronave utilizada é classificada como sendo de asa fixa, modelo “Zangão” produzida pela Skydrones (Figura 4a). A câmera RGB modificada com o filtro infra vermelho (Canon S110), que produz imagens espectrais com os canais nas bandas do verde, azul e infravermelho-próximo (Figura 4b). A aeronave foi programada para voar a uma altitude de 200 m de altura, o que proporcionou um pixel de 7,66 cm. Em função de dias impróprios para o voo (precipitação, sem a presença de sol; alta nebulosidade) realizou-se dois voos durante o ciclo da soja, sendo quanto a mesma estava no estágio R5 (Figura 4c) (enchimento do grão) e R5.5 (Figura 4d) (vagens com 50% e 75% de granação), sendo nos dias 28/01/2016 e 22/02/2016, respectivamente.

Figura 4 – Modelo de PRAS (a) e câmera utilizada (b) durante as avaliações realizadas nos estágios R5 (c) e R5.5 (d) da cultura da soja



Para o processamento das imagens e elaboração do ortomosaico, utilizou-se o Software Pix4Dmapper. Para cada pixel estabeleceu-se um ponto central representativo de NDVI o que gerou aproximadamente para cada voo 195.500 pontos. Para reduzir, filtrar e facilitar as análises seguintes, os dados foram submetidos ao software CR-Campeiro 7, onde aplicou-se a mesma malha utilizada nas avaliações precedentes (70,71 x 70,71 m), com os pontos coincidentes. O NDVI foi calculado conforme a Equação 1.

$$NDVI = \frac{(NIR-Blue)}{(NIR+Blue)} \quad (1)$$

onde: NIR é a banda do infravermelho próximo e Blue é a banda do azul.

No mesmo momento da realização dos dois voos com o RPAS, realizou-se leituras com o GreenSeeker, buscando comparar com as leituras realizadas com o RPAS. Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação nas faixas do vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (770 nm). A leitura de reflectância é calculada por microprocessador interno, fornecendo assim o NDVI conforme a Equação 2. As leituras com o GreenSeeker foram realizadas nos 147 pontos já delimitados anteriormente com a malha amostral, sendo as

leituras realizadas entre 0,8 e 1,0 m acima e paralelamente à superfície do solo, em cinco repetições por ponto em um raio de 10 m do ponto central, sendo cada repetição composta de leituras representativas de cinco metros lineares. O NDVI foi calculado conforme a Equação 2.

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad (2)$$

onde: NIR é a banda do infravermelho próximo e R é a banda do vermelho.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos inicialmente à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, com o auxílio do programa computacional Statistical Analysis System – SAS 8.0. Os parâmetros estatísticos determinados foram: mínimo, média, máximo, desvio padrão e coeficientes de variação (CV%), de assimetria (Cs) e de curtose (Ck). Com base nos valores de CV(%) obtidos, a dispersão dos dados foi classificada em: baixa, para CV <15%; moderada, para CV de 15 a 35%; e alta, para CV >35% (WILDING e DREES, 1983). Os valores de Ck, que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, que geralmente é a curva normal, foram classificados em: Ck = 0, distribuição é mesocúrtica; Ck < 0, platicúrtica e Ck > 0, leptocúrtica. Os valores de Cs que visam caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados em: Cs > 0, distribuição assimétrica à direita; Cs < 0, distribuição é assimétrica à esquerda; e Cs = 0, a distribuição é simétrica. Verificou-se também, a existência de tendência central (normalidade) dos dados originais por meio do Teste W ($p < 0,05$), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram p -valor < 0,05.

Em virtude de que a maioria das variáveis não apresentavam distribuição normal, utilizou-se a correlação de Spearman com a finalidade de observar a similaridade entre os atributos do solo, da cultura da soja e da aveia preta e das leituras “por terra” com o Green Seeker e com o RPAS avaliados nos estágios R5 e R5.5 na cultura da soja. Esse tipo de correlação é uma técnica estatística não paramétrica análoga ao coeficiente de correlação de Pearson, sendo mais indicada em casos onde os dados não seguem uma distribuição paramétrica (PASSARI et al., 2011).

Para selecionar entre as variáveis analisadas as que realmente influenciam no rendimento de grãos da cultura da soja, aplicou-se a regressão múltipla Stepwise ($Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$). Seu funcionamento ocorre através da sistemática adição ou remoção de variáveis na regressão, realizada com base em um teste estatístico de significância de cada variável, sendo que neste estudo, adotou-se o nível de significância de 5%, que inclui no modelo final, somente variáveis que influem decisivamente na variável dependente. As equações foram avaliadas conforme o coeficiente de determinação, erro padrão residual e o teste de Durbin-Watson. O teste de Durbin-Watson varia de 0 a 4 em que valores mais próximos de 2 indicam valores ótimos (NETER et al., 1985), ou seja, a não existência de autocorrelação dos dados.

A análise geoestatística foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (VIEIRA, 2000), sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear) utilizando-se o programa computacional Gamma Design Software – GS+ (ROBERTSON, 1998). O ajuste dos modelos foi realizado com base no melhor coeficiente de determinação (r^2) e na menor soma de quadrados do resíduo (SQR), e foi confirmado pela técnica de validação cruzada. Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar (C_0+C_1) e alcance (a). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação: $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$. Com base nos IDE, classificou-se o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para $IDE \leq 25\%$; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para $IDE > 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994).

Depois de analisar os semivariogramas dos dados e sendo observada a dependência espacial entre as amostras, utilizou-se o software SURFER 11® para a espacialização dos resultados por meio de mapas temáticos. O interpolador utilizado foi a krigagem ordinária, levando-se em conta os parâmetros do semivariograma (modelo ajustado, efeito pepita, alcance e patamar) determinados pela análise geoestatística.

Zonas de Manejo

As zonas de manejo foram confeccionadas objetivando definir áreas uniformes para a gestão das variáveis que influenciam no rendimento, buscando intervenções no manejo seja a curto, médio ou a longo prazo. Além disso, as zonas de manejo foram definidas a partir de dois métodos, buscando verificar a diferença entre esses no resultado final.

O primeiro método foi através da análise dos componentes principais. A análise dos componentes principais em conjunto de dados são definidos como combinações lineares de variáveis que contabilizam a variância máxima dentro de todo o conjunto de dados, descrevendo vetores de ajuste mais próximo as observações no espaço p -dimensional, sujeito a ser ortogonal ou outra (YAN et al., 2007). Para selecionar os componentes principais para a confecção das zonas de manejo, os critérios foram semelhantes aos adotados por Yan et al., (2007), onde foram selecionados os componentes principais que apresentarem autovalores maiores que um e apresentem taxa da variância acumulada $> 85\%$.

Após a definição dos componentes principais, utilizou-se os índices fuzziness performance index (FPI) e normalized classification entropy (NCE) para determinar o melhor número de clusters (zonas de manejo), assim como o desempenho geral dos mesmos. O FPI (Equação 1) ou índice de desempenho de imprecisão é uma medida do grau das diferentes classes de associação (imprecisão) e os valores variam entre 0 e 1 (ODEH et al., 1992). Já o NCE (Equação 2) ou entropia da partição modificada, é utilizada para decidir quantos clusters são mais adequados para a definição das zonas de manejo (BEZDEK, 1981). O número ideal de clusters ocorre quando os dois índices são mínimos (FRIDGEN et al., 2004)

$$FPI = 1 - \frac{c}{(c-1)} \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^2 \right] \quad (1)$$

$$NCE = \frac{n}{n-c} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} \log_a(u_{ik}) \quad (2)$$

onde: c = valores dos centróides do cluster; u_{ik} = valores para cada observação K e cluster i ; \log_a = qualquer número inteiro positivo e n = número de dados analisados.

As configurações escolhidas foram medida de similaridade euclidiana; expoente fuzziness = 1,3; número máximo de iterações = 300; critério de convergência = 0,0001; número mínimo de zonas = 2 e o número máximo de zonas = 8.

No segundo método, utilizou-se o software Management Zone Analyst (MZA) 1.0.1 (FRIDGEN et al., 2004). Esse software utiliza o *fuzzy c-means clustering algorithms* ou algoritmos de agrupamento difuso, que tem o propósito de particionamento das observações no espaço em grupos c ou clusters. O termo “Fuzzy” refere-se à associação compartilhada entre as classes. Após a definição do número de classes, as mesmas também foram

submetidas aos índices fuzziness performance index (FPI) e normalized classification entropy (NCE) para determinar o melhor número de clusters (zonas de manejo).

Com a finalidade de discriminar o grau de diferenciação entre as zonas de manejo depois de definidas, em cada uma das mesmas selecionou-se 10 pontos amostrais representativos de sete repetições e aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística descritiva dos atributos químicos do solo está representada na Tabela 2. Com base nisso, observa-se que apenas o P, MOS, Ca, CTC e, V apresentaram distribuição normal dos dados justificando-se pelos coeficientes de assimetria e curtose próximos à zero e coeficientes de assimetria e curtose classificados como assimétrica à esquerda ($C_s < 0$) e platicúrtica ($C_k < 0$) para o P e V, assimétrica à direita ($C_s > 0$) e platicúrtica ($C_k < 0$) para a MOS e C e assimétrica à direita ($C_s > 0$) e leptocúrtica ($C_k > 0$) para Ca e CTC respectivamente. Cabe salientar, que a normalidade dos dados não é uma exigência, porém, a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos, quando utiliza-se análises que envolvam modelos lineares (WEBSTER e OLIVER, 2007), porém, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo, principalmente quando o objetivo for estimar valores por meio da geoestatística (CAVALCANTE et al., 2007).

Tabela 2 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados na profundidade de 0-0,10 m

Variáveis ¹	Mínimo	Média	Máximo	CV% ²	DP ³	Cs ⁴	Ck ⁵	W ⁶
pH _{água}	4,80	5,29	5,90	3,97	0,21	0,09	-0,33	0,93*
P (mg dm ⁻³)	5,30	13,30	22,00	27,66	3,68	-0,09	-0,27	0,99 ^{ns}
K (mg dm ⁻³)	96,0	171,00	353,00	25,21	43,11	1,21	2,48	0,93*
MOS (g dm ⁻³)	2,80	3,70	4,80	11,89	0,44	0,02	-0,55	0,98 ^{ns}
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,20	0,60	85,00	0,17	0,08	-1,04	0,90*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,00	5,50	7,50	11,81	0,65	0,28	0,44	0,98 ^{ns}
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,70	2,30	3,00	11,73	0,27	0,51	0,06	0,96*
Al+H (cmol _c dm ⁻³)	3,50	6,10	9,70	21,14	1,29	0,41	0,09	0,96*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	10,20	14,30	17,90	9,37	1,34	0,15	0,22	0,99 ^{ns}
V (%)	42,00	57,50	73,00	10,99	6,32	-0,01	-0,18	0,99 ^{ns}
m (%)	0,00	2,75	8,500	78,57	2,19	0,28	-0,74	0,92*

¹ Onde: P= fósforo; K= potássio; MOS= matéria orgânica do solo; Al= acidez trocável; Ca= cálcio; Mg= magnésio; H+Al= acidez potencial; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação por bases; m= saturação por alumínio; C= carbono no solo. ² Coeficiente de variação; ³ Desvio Padrão; ⁴ Coeficiente de assimetria; ⁵ Coeficiente de curtose; ⁶ Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: * significativo em níveis de $p < 0,05$ e ^{ns} não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Quanto as dispersão dos dados, verificou-se que os atributos referente a pH, MOS, Ca, Mg, CTC e, V, apresentaram dispersão baixa na área de estudo (CV: <15%) onde os valores variaram de 3,97 a 11,89 % (Tabela 2). Apenas os atributos referentes ao Al e m (%) tiveram

dispersão classificada como alta (CV: >35%) com valores de 78,57 a 85,00 %, respectivamente.

Com base nos valores de pH (< 5,5) constata-se que parte da área necessita de correção quanto a acidez (COMISSÃO..., 2016) (Tabela 2). Como já destacado por Streck et al., (2008) e Anjos et al. (2012), áreas de Latossolo necessitam de uma atenção maior quanto a acidez, pois essa é de ocorrência natural pelo forte intemperismo e também às práticas de manejo adotadas. A que apesar dos valores de pH serem classificados como de baixa dispersão, deve-se destacar que esses valores referem-se a sua escala logarítmica, o que pode influenciar na comparação com outras variáveis sem essa particularidade (CANTARUTTI et al., 2007).

Os valores de P foram classificados de baixo a muito alto, de acordo com o teor de argila que foi > 60% em toda a área (COMISSÃO..., 2016) de acordo com os valores mínimos, médios e alto, indicando a já destacada variação desse nutriente no solo (NANNI et al., 2011; DALCHIAVON et al., 2012; FERRAZ et al., 2012) (Tabela 2). Para o K os valores foram classificados de alto a muito alto na área de acordo com os valores de CTC, que foi classificada de médio a alto. Os altos valores de K quando comparados ao P, estão atrelados ao histórico de sucessivas adubações utilizando formulações com elevadas quantidades de K adicionada às culturas (RHEINHEIMER et al., 2001).

Para os valores Ca e Mg foram considerados satisfatórios em toda a área (COMISSÃO..., 2016) (Tabela 2). Normalmente os teores adequados de Ca Mg e K atuam simultaneamente com o acúmulo desses nas plantas, em que o balanço desses nutrientes no solo pode corresponder ao suprimento ótimo pelas culturas de interesse (HERNANDEZ e SILVEIRA, 1998).

A MO foi classificada como média na área (COMISSÃO..., 2016) (Tabela 2). Mesmo a área em questão sendo manejada em SPD a mais de 20 anos, os teores médios de matéria orgânica pode estar ligados a dificuldade de aumentar seu teor em condições de clima tropical e subtropical com solos em avançado estágio de intemperização (BRADY & WEIL, 2013) e também por ocasionais de manejo de manejo (períodos sem rotação de culturas, correção da compactação por meio de aração entre outras) que não propiciaram adequado fornecimento de carbono orgânico no solo. O SPD normalmente contribui para o aumento da MOS e, conseqüentemente, diminuição de CO₂ para a atmosfera, principalmente em áreas como SPD com vários anos de gestão (NETO et al., 2009).

Os resultados da análise da estatística descritiva do rendimento e população de plantas da cultura da soja e da composição química da matéria seca da cultura da aveia preta,

mostram que, para nenhuma dessas variáveis, observou-se distribuição normal, com os coeficientes de assimetria e curtose classificados como assimétrica à direita ($C_s > 0$) e platicúrtica ($C_k < 0$) para a MS e CA na aveia preta e assimétrica à direita ($C_s > 0$) e leptocúrtica ($C_k > 0$) para Ren e Pop na cultura da soja, NA, PA, KA, CaA e CA na cultura da aveia preta (Tabela 3).

Quanto a dispersão dos dados, a Pop apresentou dispersão classificada como baixa (CV: $< 15\%$) e já a Ren e a MS, NA, PA, KA, MgA e CA da aveia preta apresentaram dispersão classificada como moderada (CV 15 a 35%) sendo que apenas o CaA apresentou dispersão classificada como alta (CV $> 35\%$) (Tabela 3).

Tabela 3 – Estatística descritiva da composição química da matéria seca da cultura da aveia preta e do rendimento e população de plantas da cultura da soja

Variáveis ¹	Mínimo	Média	Máximo	CV% ²	DP ³	C _s ⁴	C _k ⁵	W ⁶
Aveia preta								
MS (kg ha ⁻¹)	2.227,20	4.509,74	7.722,93	26,37	1.189,64	0,54	-0,27	0,96*
NA (kg ha ⁻¹)	25,33	50,70	114,90	30,57	15,50	0,95	1,36	0,94*
PA (kg ha ⁻¹)	5,64	9,50	17,30	25,37	2,41	0,79	0,41	0,95*
KA (kg ha ⁻¹)	22,70	43,50	90,90	29,84	12,98	0,89	0,74	0,94*
CaA (kg ha ⁻¹)	2,92	6,70	19,10	44,48	2,98	2,16	5,91	0,79*
MgA (kg ha ⁻¹)	3,95	6,90	13,00	28,84	1,99	0,83	0,12	0,93*
CA (kg ha ⁻¹)	483,20	953,60	1.498,70	24,42	232,91	0,44	-0,38	0,97*
Soja								
Ren (kg ha ⁻¹)	2.264,20	4.856,50	9.717,90	27,50	1.335,35	0,67	0,65	0,97*
Pop (plantas ha ⁻¹)	77.777,78	115.696,60	165.185,2	10,92	12.631,73	0,42	3,31	0,92*

¹ Onde: Ren= rendimento de grãos da soja; Pop= população de plantas da soja; MS= matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na matéria seca da aveia preta; PA= fósforo acumulado na matéria seca da aveia preta; KA= potássio acumulado na matéria seca da aveia preta; CaA= cálcio acumulado na matéria seca da aveia preta; MgA= magnésio acumulado na matéria seca da aveia preta; CA= carbono na matéria seca da Aveia Preta. ² Coeficiente de variação; ³ Desvio Padrão; ⁴ Coeficiente de assimetria; ⁵ Coeficiente de curtose; ⁶ Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: * significativo em níveis de $p < 0,05$ e ^{ns} não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

A Ren e a Pop da soja teve amplitude de 2.264,2 a 9.717,9 kg ha⁻¹ com média de 4.856,5 kg ha⁻¹ e 77.777,78 a 165.185,2 plantas ha⁻¹ com média de 115.696,60 plantas ha⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Apesar de ser considerada uma cultura características de alta plasticidade, ou seja, alta capacidade de adaptação às condições ambientais e de manejo por meio de modificações na morfologia da planta e nos componentes de produção (RAMBO et al., 2003), nem sempre essa teoria é bem aceita (HEITHOLT et al., 2005; LUDWIG et al., 2001), onde certos fatores de variações no seu ambiente de produção, como é o caso da Pop, que apesar de apresentar baixa dispersão na área, podem afetar a rendimento da mesma, mesmo em caso de uma área irrigada, como é o caso deste estudo, e com alto emprego de tecnologias no manejo da variabilidade dos fatores do sistema de produção.

O rendimento da MS da cultura da aveia preta variou de 2.227,20 a 7.722,93 kg ha⁻¹ com média de 4.509,74 kg ha⁻¹ (Tabela 3). De acordo com Da Ros e Aita (1996), Gonçalves et al. (2000) e Aita et al. (2001) em estudos buscando quantificar o rendimento da mesma

cultura em SPD, encontraram os valores médios de 3.784, 3.900, 4.417 e kg ha⁻¹ respectivamente, o que confere com os resultados deste estudo, porem como visto, esses valores podem atingir mínimos e máximos de aproximadamente 2.000 e 8.000 kg ha⁻¹, o que certamente indica um fator de variabilidade em áreas sob SPD.

Com base nos valores acumulados de NA, PA e KA na massa seca da aveia preta, constatou-se valores de 25,33 a 114,90 kg ha⁻¹ com média de 50,70 kg ha⁻¹, 5,64 a 9,50 kg ha⁻¹, com média de 17,30 kg ha⁻¹ e 22,70 a 43,50 kg ha⁻¹ com média de 90,9 kg ha⁻¹ respectivamente (Tabela 3). Baseado nisso, a ordem de acúmulo pela aveia preta em SPD foram N>K>P.

A amplitude dos valores de CaA e MgA variaram de 2,92 a 6,70 kg ha⁻¹ com média de 19,10 kg ha⁻¹ e 3,95 a 6,90 kg ha⁻¹ com média de 13,00 kg ha⁻¹, respectivamente(Tabela 3). Estudos apontam que o acúmulo de Ca e Mg na massa seca da aveia preta é influenciada pela adubação seja esta durante o ciclo da cultura ou pela adubação de cultivos anteriores (SANTI et al., 2003; NAKAGAWA e ROSOLEM, 2005; PRADO et al., 2006), o que demonstra que a aveia preta pode liberar-los de modo diferenciado para a cultura sucessora por meio da ciclagem de nutrientes, segundo a concentração de nutrientes no solo.

Os resultados da estatística descritiva para o NDVI gerado com as leituras “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS avaliados nos dois estágios da cultura da soja (R5 e R5.5) (Tabela 4), também não foi observado a distribuição normal para a variáveis, sendo que os coeficientes de assimetria apresentaram um padrão bem definido sendo assimétrica à esquerda (Cs < 0) e leptocúrtica (Ck > 0) para todas as variáveis.

Tabela 4 – Estatística descritiva do NDVI gerado a partir de leituras “por terra” com o Green Seeker e com o RPAS avaliados nos estagio R5 e R5.5 na cultura da soja

Variáveis ¹	Mínimo	Média	Máximo	CV% ²	DP ³	Cs ⁴	Ck ⁵	W ⁶
NGS5	0,24	0,85	0,97	9,41	0,08	-4,48	26,01	0,54*
NGS55	0,54	0,86	0,91	4,65	0,04	-4,05	31,80	0,73*
NR5	0,43	0,53	0,60	7,55	0,04	-0,43	0,06	0,97*
NR55	0,20	0,51	0,59	9,80	0,05	-3,11	15,19	0,74*

¹ Onde: NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; NGS55= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5.5 na cultura da soja; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; NR55= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5.5 na cultura da soja. ² Coeficiente de variação; ³ Desvio Padrão; ⁴ Coeficiente de assimetria; ⁵ Coeficiente de curtose; ⁶ Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: * significativo em níveis de $p < 0,05$ e ^{ns} não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Quanto aos resultados referentes a dispersão dos dados, para todas as variáveis a dispersão foi classificada como baixa (CV < 15%;) com coeficientes de 9,41, 4,65, 7,55 e 9,80 % para NGS5 e NGS55, NR5 e NR55, respectivamente (Tabela 4). Zhitao et al. (2014) também não encontram grandes variações no NDVI durante a semeadura à maturação fisiológica na cultura da soja, contudo a baixa variação do NDVI não interfere na capacidade

do mesmo de ser uma boa ferramenta para representar a variabilidade de uma cultura em determinada área, isso por que, a baixa variação dos valores de NDVI na área de estudo pode estar relacionado com o estágio da soja, a qual se encontrava em R5 e R5.5, isto é, com alta área foliar o que tende a estabilizar os valores de NDVI.

O NGS5 e NGS55 apresentaram valores com amplitude de 0,24 a 0,97 com média de 0,85 e 0,54 a 0,91 com média de 0,86 respectivamente (Tabela 4). Nas leituras no primeiro estágio os valores mínimos tenderam a ser mais baixo, com diferença de 0,30, que indica mesmo em período curtos de avaliação, como é o caso deste estudo, o NDVI pode apresentar variações, onde se deve levar essa informação em consideração no momento da análise dos resultados com esse índice. O mesmo ocorreu para as leituras realizadas com o RPAS, porem de ordem contraria, em que os valores para NR5 e NR55 apresentaram amplitude de 0,43 a 0,60 com média de 0,53 e 0,20 a 0,59 com média de 0,51, em que novamente os valores mínimos apresentaram as maiores diferenças, sendo de ordem 0,23, porem, neste caso, no primeiro estágio avaliado, o que permite inferir que além da diferenças entre as leituras existe diferenças entre os sensores de avaliação do NDVI.

A correlações entre os atributos químicos do solo, da cultura da soja e da aveia preta e das leituras “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS avaliados nos estagio R5 e R5.5 na cultura da soja são apresentados na Tabela 5. Quanto aos atributos químicos do solo, observou-se que o pH apresentou correlação de ordem positiva com Ca (0,25), Mg (0,33), CTC (0,28) e V (0,50) e negativa para Al+H (-0,46), e m (-0,69). A correlação positiva com a CTC e a V indicam que com o aumento do valor do pH há liberação de sítios de troca negativo dos colóides do solo e disponibilidade de cátions básicos (LIMA et al., 2010), como é o caso do Ca e Mg nesse estudo. A correlação negativa com Al+H e m, ressalta uma condição análoga a anterior, pois com o aumento do pH mais Al é precipitado e mais hidrogênio se torna indisponível, ficando nos sítios de troca, antes ocupados por H e Al (SILVA et al., 2006). Esse efeito pode também ser observado em outros nutrientes como é o caso do P e K, que apresentaram correções positivas com Mg (0,18) e CTC (0,38) respectivamente, demonstrando que a correção do pH é um fator importante no manejo em áreas sob SPD.

A MO apresentou correlação positiva com Al+H (0,24), CTC (0,27) e, V (0,17) o que reforça o importante papel da mesma como fornecedora de cátions para o solo (ABREU et al., 2001; SOUZA et al., 2016) (Tabela 5).

Para o Ca e Mg destaca-se a correlação positiva entre os mesmos (0,48) além das correlações positivas com a V e negativa com a m sendo de 0,52 e 0,46 e -0,42 e 0,36 respectivamente.

Para o Al+H e CTC as correlações foram semelhantes, onde os mesmos apresentaram correlação positivas para V e negativas para m, com valores de -0,87 e -0,45 e 0,52 e 0,22 respectivamente e além disso, o Al+H apresentou correlação negativa com a CTC (-0,75).

A Ren apresentou correlação positiva com os atributos químicos do solo referentes ao P (0,34) e a MO (0,27) e negativa com o Mg (-0,20) (Tabela 5). A correlação positiva com os teores de P no solo já era esperada devido à alta dependência da cultura da soja a esse nutriente e também que em solos tropicais ocorre a em consequência do material de origem e da forte interação do P com o solo (RAIJ, 1991), em que menos de 0,1% encontra-se em solução (FARDEAU, 1996). A MO demonstrou também ser um fator importante na Ren, o que pode ser devido aos efeitos benéficos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo em SPD, proporcionando um ambiente favorável para o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (SALVO et al., 2010; MAZZILLI et al., 2015). A correlação negativa com o Mg do solo pode ser explicada pela relação do balanço entre a extração e exportação desse nutriente no solo, pois como já visto anteriormente os teores desse nutriente foram considerados adequados na área.

Quanto à cultura da aveia preta, observou-se principalmente a correlação positiva do P no solo, com as quantidades acumuladas de 38 para NA, PA, KA, CaA, MgA, CA e MS sendo de ordem 0,37, 0,28, 0,41, 0,29, 0,42, 0,43, 0, respectivamente (Tabela 5). Esse efeito se deve ao fato de que o P influencia a maioria dos macronutrientes exportados na MS da aveia preta (ROZANE et al., 2008; MELO et al., 2011), onde nesse caso, os teores altos no solo favoreceram o incremento da MS. Contudo como discutido anteriormente, os teores de P no solo deste estudo apresentou considerável variação na área de estudo, sendo que isso provavelmente irá influenciar na exportação de nutrientes na MS da aveia preta. Ademais, houve correlação significativa entre o NA KA e o CA com a CTC do solo, sendo de ordem 0,20, 0,25 e 0,18 respectivamente, além da correlação de negativa de -0,24 e 0,17 entre KA e MgA com o Al+H respectivamente, o que reafirma o efeito benéfico do aumento da CTC e em contrapartida, os de Al+H em solos tropicais cultivados em SPD.

O NA, MgA, CA e MS da cultura da aveia preta apresentaram correlação positiva com o Ren da cultura da soja, sendo de ordem 0,30, 0,26, 0,21 e 0,23 respectivamente (Tabela 5). De acordo com Crusciol et al. (2008), em estudos taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em SPD sob um Latossolo Vermelho, verificaram

os pontos de máxima liberação acumulada foram atingidos aos 63, 50 e 53 dias após a coleta para NA, MgA, CA respectivamente, o que caracteriza uma liberação gradual, semelhante ao estágio R3/R4 da cultura da soja neste estudo. Para a MS os autores encontram que aos 53 após as coleta restavam, apenas 33,6% da quantidade inicial. A Pop da soja foi influenciada positivamente pelo NA, PA, CA MS sendo de ordem 0,19, 0,18, 0,16 e 0,18 respectivamente, o que ressalta que a combinação desses nutrientes ciclados pela aveia preta apresentam efeitos na população efetiva de plantas na cultura da soja.

As leituras de NDVI realizadas com o “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS, apresentaram correlação positiva com o P (0,28) para o NGS55. No NGS5 e NR5 observou-se correlação positiva com a MO, sendo de ordem 0,35 e 0,25 respectivamente e para o NGS5, NR5 e NR55 houve correlação com CS sendo de ordem 0,31, 0,26 e 0,21 respectivamente (Tabela 5). Esses resultados demonstram que o índice de NDVI é capaz de detectar os efeitos da variação de P, MO e CS do solo na cultura da soja, sendo que outros trabalhos podem ser realizados em outros estágios e diferentes culturas. Houve também correlação para as duas formas de avaliação de NDVI nos dois estágios da soja com o Ren, onde as maiores correlações foram encontradas para o NGS55 e NR5 sendo de ordem 0,31 e 0,47, o que demonstra para ambas as formas de avaliação e independente do estágio o índice é capaz de estimar o rendimento de grãos da soja. A Pop de plantas da soja apresentou também correlação positiva com NDVI, avaliado por meio do RPAS nos dois estágios da soja sendo de ordem 0,25 e 0,21, o que demonstra que existe efeito da Pop da soja no NDVI avaliado pelo RPAS e deve ser levado em consideração na interpretação dos resultados.

Foram observadas correlações positivas com a MS e as propriedades químicas da aveia preta. O NGS5, NGS55 e NR5 apresentaram correlação positivas com CA e MS, sendo de ordem 0,18, 0,21 e 0,26 e 0,20, 0,18 e 0,26 respectivamente (Tabela 5). Já o NGS55 o NR5 apresentaram correlação positiva com PA e o MgA, sendo de ordem 0,20 e 0,26 e 0,21 e 0,19 respectivamente. No caso do NGS55 e NR5, estes apresentaram correlação com o NA (0,29) e o CaA (0,20) respectivamente e já NGS5 e NGS55 foram correlacionados com o KA sendo de ordem de 0,33 e 0,19 respectivamente. Em geral observa-se que existe a tendência de que os nutrientes ciclados pela aveia preta e posteriormente avaliados pelo NDVI na soja, podem variar de acordo com estágios da cultura da soja e as formas de avaliação, o que pode ser devido a dinâmica da disponibilidade dos mesmo no solo e as respostas fisiológica da soja.

Cabe destacar que foram observadas correlações positivas entre as leituras realizadas “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS nos mesmos estágio e em diferentes estágios (Tabela 5). O NR5 e NR55 apresentaram correlação positiva com o NGS5 (0,45) e NGS55

(0,41) e ainda o NR55 apresentou correlação positiva com NR5 (0,31). Essas relações, principalmente entre as leituras realizadas “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS, são importantes em ressaltar, pelo fato de que ainda havia incertezas quanto a leituras do NDVI realizados com RPAS, visto que, essa tecnologia é ainda recente e necessita de validações quanto seu uso na agricultura. Com isso, como visto com esse estudo, as leituras realizadas com os RPAS são correlacionadas positivamente com as leituras realizadas “por terra” com o GreenSeeker, onde as avaliações com NDVI “por terra” com o GreenSeeker podem ser substituídas pelo RPAS, principalmente pela maior facilidade de operação em grandes áreas como é o caso deste estudo.

Tabela 5 – Matriz de correlação de Spearman entre as propriedades químicas do solo, da cultura da soja e da aveia preta e das leituras realizadas “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS avaliados nos estágios R5 e R5.5 na cultura da soja

(continua)

	pH	P	K	Mo	Al	Ca	Mg	Al+H	CTC	V	m
pH	-										
P	-0,13	-									
K	0,01	0,10	-								
MO	-0,13	0,03	0,15	-							
Al	0,00	0,04	0,03	0,07	-						
Ca	0,25**	0,07	-0,01	0,08	-0,10	-					
Mg	0,33**	0,18*	0,05	-0,01	0,05	0,48**	-				
Al+H	-0,46**	-0,11	-0,08	0,24**	0,08	-0,20*	-0,24**	-			
CTC	0,28**	0,38**	-0,09	0,27**	0,09	0,33**	0,15	-0,75**	-		
V	0,50**	0,13	0,05	0,17*	-0,12	0,52**	0,46**	-0,87**	-0,45**	-	
m	-0,69**	-0,06	0,08	0,15	0,06	-0,42**	-0,36**	0,52**	0,22**	-0,63**	-
Ren	0,03	0,34**	0,14	0,27*	-0,05	-0,12	-0,20*	0,10	0,02	-0,10	-0,06
Pop	-0,15	0,10	0,09	0,01	-0,14	-0,11	-0,06*	-0,11	-0,12	0,07	0,07
NA	0,01	0,37**	0,01	-0,05	-0,06	-0,04	-0,00	-0,16	0,20*	0,13	-0,11
PA	-0,04	0,28**	-0,03	-0,02	-0,05	-0,05	0,02	-0,03	-0,05	0,05	-0,09
KA	-0,02	0,41**	0,06	0,07	-0,03	-0,01	-0,03	-0,24**	0,25**	0,18*	-0,06
CaA	0,01	0,29**	0,15	0,09	0,01	-0,05	-0,00	-0,12	-0,15	0,08	-0,02
MgA	0,02	0,42**	0,00	0,02	-0,00	0,01	0,02	-0,17*	-0,14	0,15	-0,14
CA	-0,02	0,43**	0,02	0,01	-0,01	-0,07	-0,08	-0,11	0,18*	0,08	-0,11
MS	-0,05	0,38**	0,02	0,01	-0,02	-0,06	-0,06	-0,12	0,15	0,09	-0,09
NGS5	-0,01	-0,13	0,07	0,35**	0,02	-0,01	-0,07	-0,10	-0,12	0,08	0,05
NGS55	0,11	0,28**	0,01	0,03	0,01	-0,06	-0,02	0,07	0,02	-0,07	-0,09
NR5	-0,09	0,01	0,00	0,25**	0,07	-0,13	0,14	0,08	-0,04	-0,13	0,06
NR55	-0,12	-0,05	-0,13	0,15	-0,02	-0,04	-0,12	0,15	0,06	-0,15	0,07

	(conclusão)										
	Ren	Pop	NA	PA	KA	CaA	MgA	CA	MS	NGS5	NGS55
pH											
P											
K											
MO											
Al											
Ca											
Mg											
Al+H											
CTC											
V											
m											
CS											
Ren	-										
Pop	0,12	-									
NA	0,30*	0,19*	-								
PA	0,12	0,18*	0,89**	-							
KA	0,14	0,10	0,71**	0,60**	-						
CaA	0,06	0,08	0,80**	0,75**	0,60**	-					
MgA	0,26**	0,14	0,94**	0,89**	0,76**	0,82**	-				
CA	0,21**	0,16*	0,89**	0,84**	0,74**	0,69**	0,89**	-			
MS	0,23**	0,18*	0,92**	0,87**	0,78**	0,71**	0,91**	0,96**	-		
NGS5	0,20*	0,01	0,14	0,00	0,33**	0,04	0,15	0,18*	0,20*	-	
NGS55	0,31**	0,04	0,13	0,20*	0,19*	0,20*	0,21*	0,21**	0,18*	0,01	-
NR5	0,47**	0,25*	0,29*	0,26*	0,12	0,09	0,19*	0,26**	0,26**	0,45**	0,01
NR55	0,27**	0,21**	0,08	0,06	0,03	-0,01	0,03	0,11	0,11	0,0	0,40**

* e ** significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro.

Com o objetivo de selecionar entre os parâmetros avaliados referentes as propriedades químicas do solo e da aveia preta, dos parâmetros Ren e Pop e das leituras leituras “por terra” com o GreenSeeker e com o RPAS avaliados nos estágios R5 e R5.5 na cultura da soja, os que influenciam realmente no Ren da cultura da soja, todos os mesmos foram submetidos a equação de Stepwise, onde somente os parâmetros que realmente influenciam no Ren serão adicionados nas equações (Tabela 6).

Tabela 6 – Equação de Stepwise para estimativa dos componentes da variável dependente rendimento de grãos da cultura da soja

Variável	Equação	r ²	EP	DW
Rendimento de grãos	Y= 3787,55+ 0,30 (MS)	0,55	0,28	1,50
	Y=2686,81+16,44(NA) + 436,91(MO)	0,66	0,38	1,45
	Y=-6655,33+16230,65(NR5) + 3134,94(NGS5) + 100,25(MgA)	0,75	0,24	1,66

EP: Erro padrão residual (%); DW: teste de Durbin-Watson. MO= matéria orgânica; MS = matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MgA= magnésio acumulado na aveia preta; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; NR5= NDVI gerado a partir RPAS no estágio R5 na cultura da soja.

Com os resultados verificou-se que foram três as equações significativas com os parâmetros avaliados que realmente influenciaram no Ren (Tabela 6). Pode-se observar que dentre os parâmetros de solo avaliados, apenas a MO integrou as equações, em que esse constatação pode ser devida ao fato de que desde 2008 a área em estudo já utiliza as ferramentas da AP para corrigir a fertilidade do solo, o que leva a inferir que os nutrientes já

encontram-se com reduzida variabilidade e suficiência na área e além disso, demonstra novamente que uns dos principais entraves em sistemas de produção com SPD em solos tropicais é a MO. A primeira equação foi composta apenas pela MS, contudo observou-se o menor r^2 dentre as três equações. Na segunda equação, as variáveis integrantes foram o NA e MO, apresentando um r^2 de 0,66. Já na terceira equação composta pelo NR5, NGS5 e o MgA, apresentando um r^2 de 0,85, sendo o maior entre as três equações. O erro padrão residual foi semelhante e considerado baixo para as três equações, apresentando amplitude de 0,24 a 0,28 %. Semelhante ao erro padrão, o teste de teste de Durbin-Watson foi semelhante nas três equações, apresentando valores que variaram de 1,45 a 1,66, sendo valores próximos ao ideal 2, demonstrando que os dados não apresentam autocorrelação (NETER et al., 1985). Como as não foi possível obter uma equação que explicasse o Ren de forma singular, definiu-se que todas as variáveis que foram ajustadas para as três equações como sendo de importância para o Ren, sendo que essas variáveis foram utilizadas nas demais avaliações deste estudo.

Após a definição das variáveis que influenciavam ou explicavam o Ren, essas foram submetidas a análise de trilha (*Path Analysis*) buscando extrair mais eficientemente a influência dessas variáveis no Ren (Tabela 7). Inicialmente os dados foram submetidos ao diagnóstico da multicolinearidade, obtido a partir da definição do coeficiente k 0,27, que promoveu a correção das distorções, possibilitando maior confiabilidade nas interpretações de causa e efeito das variáveis estudadas.

Tabela 7 – Análise de trilha com os efeitos diretos e indiretos das variáveis selecionadas com equação de Stepwise

(continua)		
Variáveis ¹	Via de Associação	Coefficiente de Trilha
MS	Efeito direto no Ren	0,12
	Efeito Indireto via NA	-0,01
	Efeito Indireto via NGS5	0,01
	Efeito Indireto via NR5	0,03
	Efeito Indireto via MO	0,17
	Efeito Indireto via MgA	0,01
	Correlação Total	0,34
NA	Efeito direto no Ren	0,00
	Efeito Indireto via NGS5	0,00
	Efeito Indireto via NR5	0,01
	Efeito Indireto via MO	0,05
	Efeito Indireto via MgA	0,01
	Efeito Indireto via MS	0,19
	Correlação Total	0,26
MO	Efeito direto no Ren	0,48
	Efeito Indireto via NA	-0,00
	Efeito Indireto via NGS5	0,00
	Efeito Indireto via NR5	-0,00
	Efeito Indireto via MgA	0,01
	Efeito Indireto via MS	0,19
	Correlação Total	0,68

(conclusão)		
NR5	Efeito direto no Ren	0,03
	Efeito Indireto via NA	0,00
	Efeito Indireto via NGS5	0,16
	Efeito Indireto via MO	0,19
	Efeito Indireto via MgA	0,06
	Efeito Indireto via MS	0,03
	Correlação Total	0,47
NGS5	Efeito direto no Ren	0,01
	Efeito Indireto via NA	0,05
	Efeito Indireto via NR5	0,03
	Efeito Indireto via MO	0,19
	Efeito Indireto via MgA	0,00
	Efeito Indireto via MS	0,02
	Correlação Total	0,20
MgA	Efeito direto no Ren	0,06
	Efeito Indireto via NA	-0,00
	Efeito Indireto via NGS5	0,00
	Efeito Indireto via NR5	0,01
	Efeito Indireto via MO	0,14
	Efeito Indireto via MS	0,03
	Correlação Total	0,24
Coefficiente de determinação		0,61
Efeito da variável residual		0,50
Constante k		0,27

¹MS = matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MO= matéria orgânica; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; MgA= magnésio acumulado na aveia preta.

Com os resultados observou-se que o coeficiente de determinação das variáveis selecionadas explicaram 0,61 da variação observada no Ren (Tabela 7). A MS apresentou efeito direto no Ren (0,17), e efeito indireto pela MO (0,17), apresentando correlação total de 0,34. O NA não apresentou efeito direto no Ren, porém foi observado efeito indireto via MS (0,19) e também via MO (0,05) o que se justifica pois mediante a MS e MO que o N entra no sistema via resíduos orgânicos, a correlação total do NA com o Ren foi de 0,26. A MO apresentou efeito direto no Ren (0,48), sendo esta a variável que mais se correlacionou de forma direta com o Ren, sendo que também se observou efeito indireto via MS (0,19) e correlação total de 0,68. Os índices de NDVI correspondentes a NR5 e NGS5 não apresentaram correlação expressiva direta com o Ren, porém os efeitos desses foram indiretamente em sua maioria com o NGS5 (0,16) e a MO (0,19) e com a MO (0,19) respectivamente, apresentando correlação total de 0,47 e 0,20 respectivamente. Já para o MgA, o efeito direto no Ren foi baixo (0,06), sendo que os maiores efeitos foram indiretamente mediante a MO (0,14) e no total apresentou correlação de 0,24.

A variáveis selecionadas através da equação de Stepwise, também foram submetidas a análise geostatística (Tabela 8). Com os resultados da análise geostatística verificou-se que todas as variáveis apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permite a interpretação e projeção dos resultados com base na estrutura das suas variabilidades (VIEIRA, 2000).

Tabela 8 – Análise geoestatística das variáveis selecionadas com equação de Stepwise e para rendimento de grãos da cultura da soja

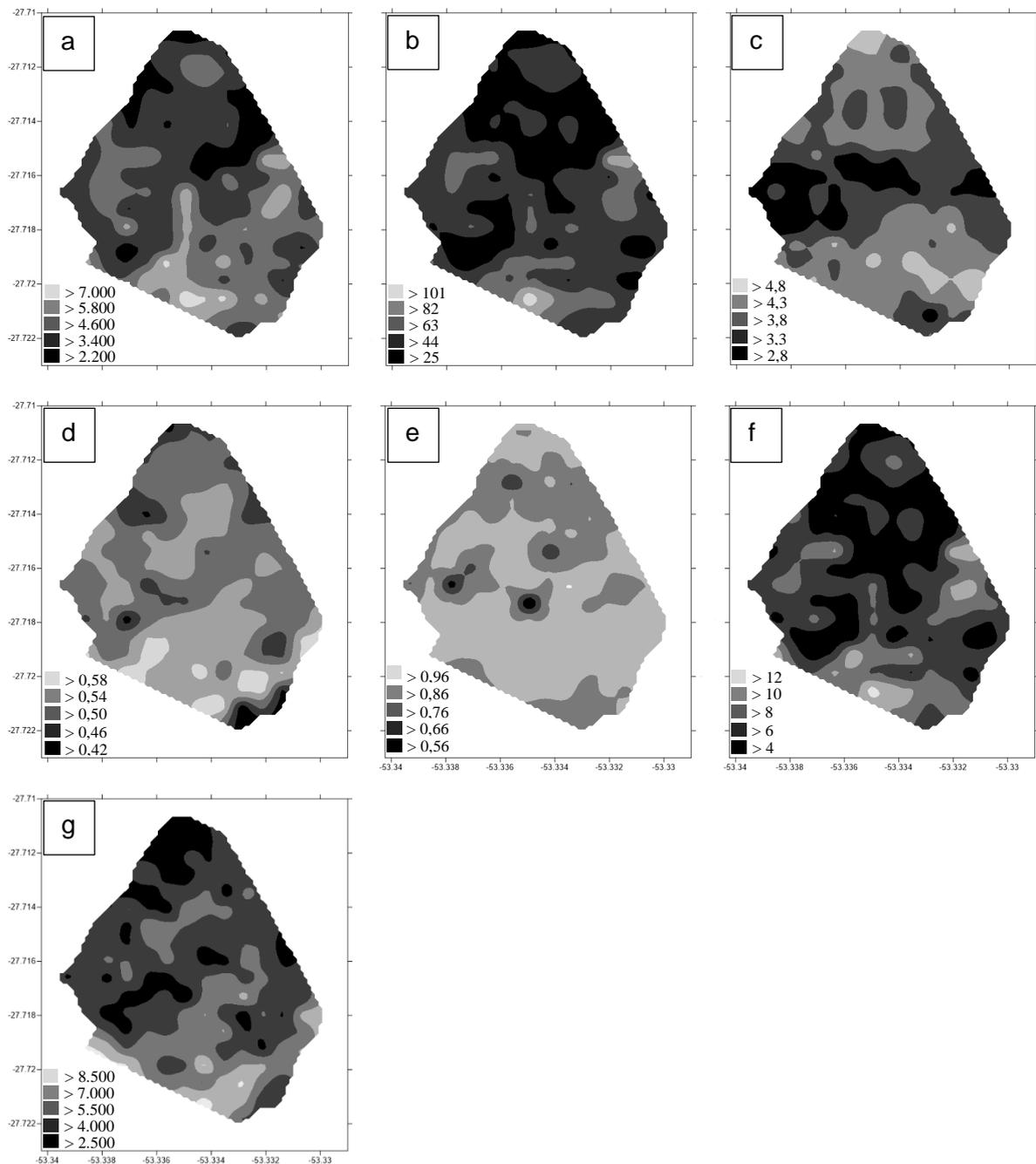
Eventos de colheita	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C ₁)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a)	Modelo	r ²	Dependência espacial	
							IDE ⁽¹⁾	GDE ⁽²⁾
MS	969000	1939000	970000	417	exponencial	0,98	49,97	moderado
NA	64,60	182,60	118	797	esferico	0,97	35,37	moderado
MO	0,0401	0,2082	0,1681	156	exponencial	0,81	19,26	forte
NR5	0,00019	0,00263	0,00244	2110	esferico	0,85	7,22	forte
NGS5	0,0007	0,0018	0,0011	1954	esferico	0,87	38,89	moderado
MgA	2,07	4,15	2,08	989	exponencial	0,88	49,88	moderado
Ren	1085880	2214680	1128800	830	exponencial	0,73	49,03	moderado

⁽¹⁾IDE: índice de dependência espacial; ⁽²⁾GDE: grau de dependência espacial. MS = matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MO= matéria orgânica; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; MgA= magnésio acumulado na aveia preta; Ren= rendimento de grãos da soja.

Os maiores alcances foram observados para as variáveis NR5 e NGS5, sendo de 2110 e 1954 m respectivamente e para as demais variáveis em ordem decrescente foram de 989, 830, 797, 417 e 156 para MgA, Ren, NA, MS e MO respectivamente (Tabela 8). O modelo exponencial foi ajustado para a MS, Mo, Ren e MgA e o modelo esférico para o NA, NR5 e NGS5. De maneira geral a dependência espacial foi classificada como moderado para as MS, NA, NGS5, MgA e Ren e forte apenas para a MO e NR5.

Após a análise geoestatística, foi possível realizar a espacialização dos valores das variáveis na área conforme a Figura 5. Com base no mapa de Ren, observa-se que as subáreas de com maior rendimento correspondente à faixa que vai de do sul a leste do mapa houve correspondência desta, principalmente em maior grau, com os mapas de MS (Figura 5a), NA (Figura 5b), MO (Figura 5c), NR5 (Figura 5d), NGS5 (e) e MgA (Figura 5f), o que reforça novamente a importância dessas variáveis no Ren. Cabe destacar que o mapa de MS apresentou o maior grau de semelhança entre os mapas anteriormente discutidos, sendo que essa característica influenciara diretamente no NA e MgA, além da MO a longo prazo.

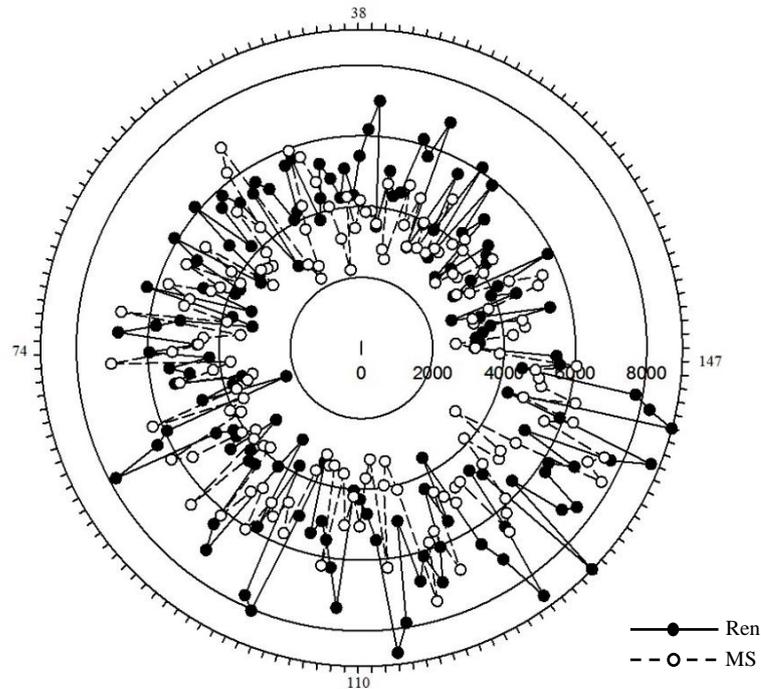
Figura 5 – Mapas de distribuição espacial para as variáveis MS (a), NA (b), MO (c), NR5 (d), NGS5 (e) MgA(f) e Ren (g)



A Figura 6 demonstra a distribuição dos valores de MS e Ren segundo os 147 pontos de amostragem da área de estudo. Observa-se que na maioria dos pontos de amostragem, existe uma relação entre os elevados valores em Ren com os maiores valores de MS. A combinação entre a MS da aveia preta com o rendimento, pode ser devido a um conjunto de vantagens que essa cultura oferece, como a redução da erosão e do escoamento superficial, o aumento da

infiltração de água e do conteúdo de carbono orgânico no solo, a ciclagem de nutrientes, a mobilização de cátions no perfil, o controle de inços (SANTI et al., 2003).

Figura 6 – Distribuição dos valores de MS (kg ha^{-1}) e Ren (kg ha^{-1}) nos 147 pontos de amostragem na área de estudo



Definição de zonas de manejo a partir do método dos componentes principais

Após a definição das variáveis, bem como, os efeitos dessas no Ren, essas variáveis foram submetidas a análise dos componentes principais, buscando definir os componentes para a confecção das zonas de manejo (Tabela 9). Com base nos resultados constatou-se que formam necessários seis componentes para explicar 100 % da variância.

Os critérios adotados para definir os componentes principais foram definidos de acordo com Yan et al. (2007), em que os autores selecionam os componentes principais que apresentarem autovalores maiores que um e apresentem taxa da variância acumulada $> 85\%$. Com base nessa classificação o primeiro e o segundo componente principal foram adequados no primeiro critério (autovalores maiores que um), contudo para atender ao segundo critério (taxa da variância acumulada $> 85\%$), decidiu-se incluir o terceiro componente principal, mesmo o este não apresentando atendo ao primeiro critério, pois entende-se que o segundo critério apresenta maior relevância nos resultados finais (Tabela 9). Com isso, observa-se que com o primeiro, segundo e terceiro componente principal pode-se explicar 85,13 % da variância total.

Tabela 9 – Análise de componentes principais para as variáveis explicativas do rendimento de grãos da soja

Componente da variância	Componente principal					
	1	2	3	4	5	6
Autovalores	2,92	1,25	0,93	0,73	0,09	0,07
Taxa da variância individual (%)	48,67	20,86	15,60	12,18	1,63	1,06
Taxa da variância acumulada (%)	48,67	69,53	85,13	97,31	98,94	100
Variáveis ¹	----- Matriz de correlação -----					
MS	0,96	-0,09	-0,03	0,04	0,27	0,01
NA	0,95	-0,19	0,01	0,03	-0,12	-0,20
MO	0,13	0,67	0,58	0,03	0,00	0,00
NR5	0,33	0,64	-0,04	0,09	0,01	0,00
NGS5	0,17	0,53	0,77	0,99	0,00	0,00
MgA	0,94	-0,13	-0,02	0,04	-0,09	0,19

¹MS = matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MO= matéria orgânica; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; MgA= magnésio acumulado na aveia preta.

Os componentes principais 1, 2 e 3 foram submetidos a análise geoestatística para a confecção dos mapas de distribuição espacial dos mesmos (Tabela 6). Entre os componentes principais o componente principal 1 foi o que apresentou maior alcance, com 2110 m, seguido dos componentes principal 2 e 3, com 1617 e 842 m, respectivamente. O modelo exponencial foi adequado para os componentes principais 1 e 3 e somente o componente principal 2 que se diferenciou dos demais, em que o modelo esférico o adequado para o semivariograma. O grau de dependência espacial foi classificado como moderado para o componente principal 1 e forte para os componentes principais 2 e 3.

Tabela 10 – Análise geoestatística para dos componentes principais 1, 2 e 3

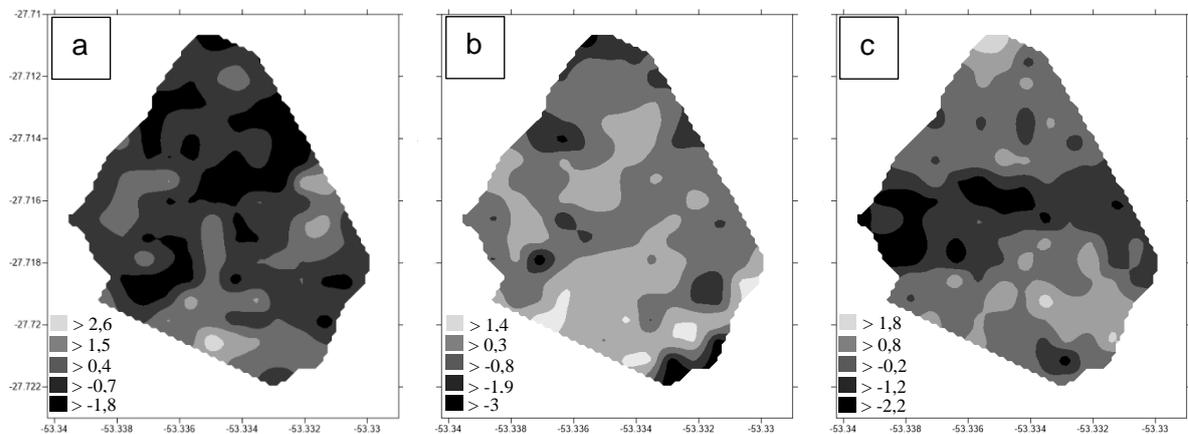
Eventos de colheita	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C ₁)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a)	Modelo	r ²	Dependência espacial	
							IDE ⁽¹⁾	GDE ⁽²⁾
Componente Principal 1	0,645	1,295	0,680	2110	exponencial	0,81	49,81	moderado
Componente Principal 2	0,298	2,043	1,745	1617	esferico	0,77	14,58	forte
Componente Principal 3	0,222	0,969	0,747	842	exponencial	0,72	22,91	forte

⁽¹⁾IDE: índice de dependência espacial; ⁽²⁾GDE: grau de dependência espacial.

Para o primeiro componente a variáveis que apresentaram as maiores cargas foram MS (0,96), NA (0,95) e MgA (0,94), observando-se que esses componentes foram compostos, em sua maioria, pelas variáveis de plantas, nesse caso, da aveia preta (Tabela 6). No segundo componente as maiores cargas foram atribuídas a MO (0,67), NR5 (0,64) e NGS5 (0,53). Já para o terceiro componente as maiores cargas foram para a MO (0,58) e NGS5 (0,77).

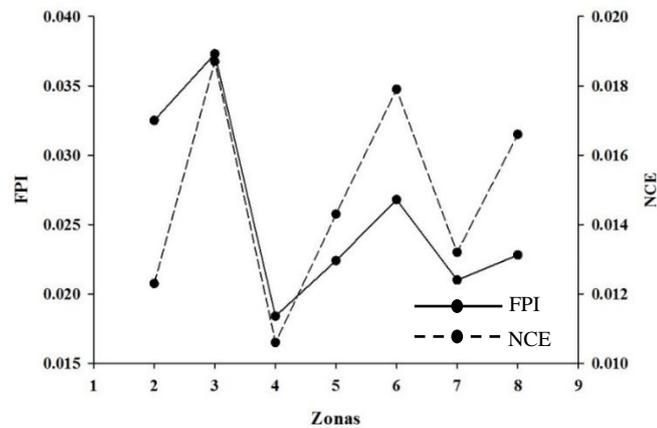
Na Figura 7 estão os resultados da distribuição espacial dos três componentes principais na área. Nota-se que não houve grandes diferenças entre os mapas de distribuição espacial dos componentes 1 (Figura 7a) e 2 (Figura 7b), onde nos mesmos observou-se as mesmas tendências, principalmente ao sul e a oeste da área. Para o componente 3 (Figura 7c), também se observou as mesmas tendências observadas nos componentes 1 e 2, porém houve uma pequena diferença na parte central do mapa, contudo de não espera-se maiores problemas com isso pelo fato das outras semelhanças, como já discutido anteriormente, com os outros dois mapas.

Figura 7 – Mapas de distribuição espacial dos componentes principais 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



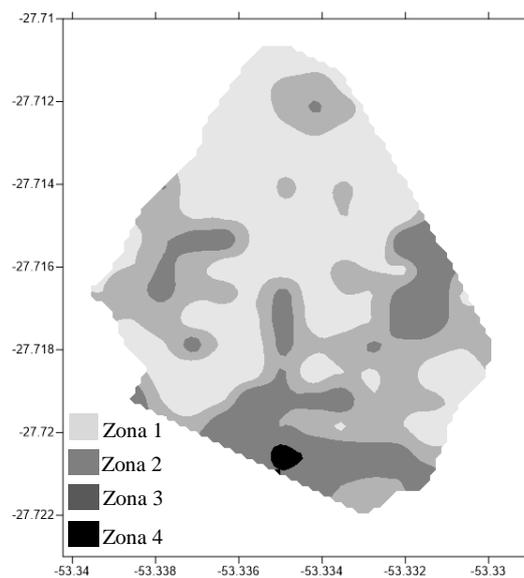
Após a definição dos componentes principais, os três componentes principais selecionados foram submetidos aos testes com os índices de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE), buscando definir o número ideal de classes para a confecção das zonas de manejo (Figura 8). Com os resultados, constatou-se que não houve acentuadas diferenças para os dois índices testados, observando-se um padrão definido de variação, sendo que, as maiores variações foram detectadas a partir da classe 4.

Figura 8 – Índice de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado para os componentes principais



Baseando-se no critério de Fridgen et al. (2004), que relatam os menores valores dos índices NCE e FPI resultam no número de zonas de manejo idôneas, pois segundo os autores, há o menor compartilhamento de associação (FPI) ou maior quantidade de organização (NCE), no processo de agrupamento, de acordo com os dois índices testados, os resultados indicaram que entre as oito zonas de manejo testadas, quatro zonas seriam o ideal para representar o conjunto dos três componentes principais (Figura 9).

Figura 9 – Mapa de zonas de manejo definidas a partir do método dos componentes principais



Na comparação das medias entre as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren nas quatro zonas de manejo definidas, pode-se contatar se realmente as zonas de manejo definidas a partir do método dos componentes principais, foram eficientes em expressar as diferenças entre as diferentes classes (Tabela 11). Como avaliação geral, constatou-se que o método foi eficiente em diagnosticar as diferenças entre as zonas de manejo. Em todas as variáveis avaliadas para as quatro zonas definidas de acordo com os método dos componentes principais, as zonas 4 e 1 foram definidas como sendo as zonas de alto e baixo potencial respectivamente, onde observou-se os mais altos e baixos valores em todas as variáveis. As Zonas 3 e 2 podem ser descritas como zonas de transição, pois foram as zonas que apresentaram as menores diferenças entre as mesmas e entre as zonas 4 e 1.

As variáveis correspondentes a MgA e MO foram as que apresentaram as menores diferenças entre as quatro zonas de manejo (Tabela 11), em que isso pode estar atrelado a magnitude dessas variáveis no solo, ou seja, as diferenças entre os valores baixos e altos dessas variáveis no solo é baixa, o que estaticamente não apresenta diferença, contudo deve-se ressaltar que mesmo não apresentando diferença estatística, pequenos incrementos desses variáveis podem se representativos em vários processos no solo e nas plantas. Já as variáveis referentes MS, NGS5, NA, MO e Ren, foram as mais bem definidas, com destaque para o Ren, o que concorda com Zhang et al. (2010), que relatam que a variabilidade espacial do Ren é de essencial importância de ser mensurada pelo fato de refletir o potencial do solo em oferecer condições idôneas para a máxima expressão desta.

Tabela 11 – Comparação de medias das variáveis MS, NA, MgA, MO, NGS5, NR5 e Ren nas quatro zonas de manejo confeccionadas a partir do método dos componentes principais

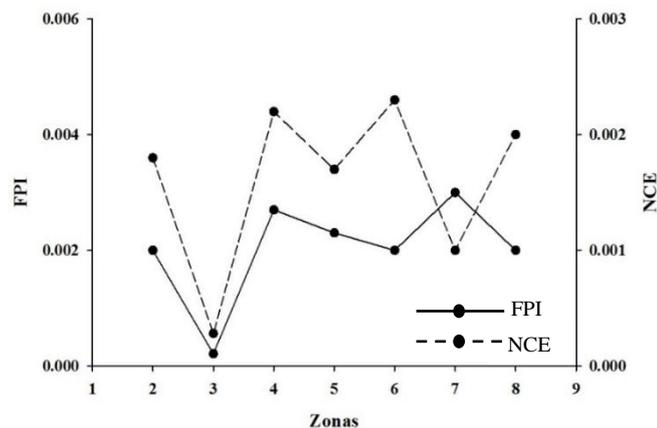
Zonas	Variáveis						
	MS	NA	MgA	MO	NGS5	NR5	Ren
Zona 1	3.592,15 c*	38,93 c	3,58 b	2,62 b	0,54 c	0,43 c	3.610,79 c
Zona 2	4.736,83 bc	51,93 bc	7,08 ab	3,38 ab	0,71 bc	0,52 b	4.408,50 bc
Zona 3	5.481,28 ab	66,80 b	8,87 a	3,65 a	0,80 ab	0,54 ab	5.539,04 b
Zona 4	6.885,43 a	91,44 a	10,98 a	4,26 a	0,91 a	0,60 a	6.568,87 a

* médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de tukey a 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$). MS= matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MgA= magnésio acumulado na aveia preta; MO= matéria orgânica; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; Ren= rendimentos de grãos da cultura da soja.

Definição de zonas de manejo a partir do algoritmo *fuzzy c-means*

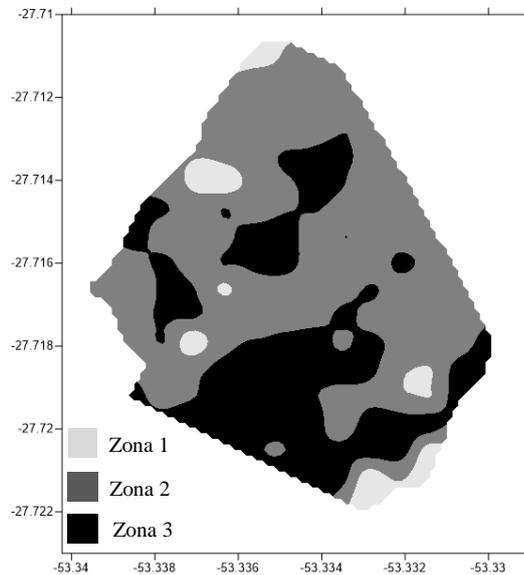
Para a definição de zonas de manejo por meio a partir do algoritmo *fuzzy c-means*, inicialmente as variáveis referentes à MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren foram submetidos aos testes com os índices de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE), buscando definir o número ideal de classes para a confecção das zonas de manejo (Figura 10). Não foram observados grandes diferenças em relação dos índices com as zonas de manejo, em que apenas a partir da zona 7 foram observadas pequenas variações, contudo não foram suficientes para alterar o resultado.

Figura 10 – Índice de performance *fuzzi* (FPI) e entropia da classificação normalizada (NCE) calculado pelo Software Management Zone Analyst para as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren



De acordo com o critério adotado por Fridgen et al. (2004), os menores valores dos índices NCE e FPI resultam no número de zonas de manejo idôneas, pois segundo os autores, há o menor compartilhamento de associação (FPI) ou maior quantidade de organização (NCE), no processo de agrupamento. Com base nisso, os resultados mostram que três zonas seriam o número ideal para representar o conjunto das variáveis referentes a MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de zonas de manejo utilizando o método de agrupamentos com algoritmo *fuzzy c-means* para para as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren



Com a comparação de médias entre as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 MgA e Ren, nas três zonas de manejo definidas com programa MZA, de modo geral, constatou-se que o método foi eficiente em diagnosticar as diferenças entre as zonas de manejo para cada variável (Tabela 12). Para todas as variáveis analisadas, as zonas de manejo 3 e 1 foram definidas como sendo as zonas de alto e baixo potencial respectivamente.

Apenas para a MO não houve diferença entre as zonas de manejo 2 e 1 (Tabela 12), sendo que como já discutido anteriormente, a não existência estatística está atrelado as baixas diferenças no solo para essa variável, contudo por mais baixas que sejam as diferenças para essa variável deve ser monitorado no solo, pois essas diferenças podem influenciar em vários processos no solo, em que a soma desses fatores acarretariam em um efeito significativo no sistema solo.

Tabela 12 – Comparação de medias das variáveis das MS, NA, MgA, MO, NGS5, NR5 e Ren nas quatro zonas de manejo confeccionadas a partir do programa *Management Zone Analyst* (MZA)

Zonas	Variáveis						
	MS	NA	MgA	MO	NGS5	NR5	Ren
Zona 1	3693.65 c*	37.87 c	3.99 c	3.54 b	0.32 c	0,44c	3.335,56 c
Zona 2	5406.36 b	54.99 b	7.33 b	3.62 b	0.50 b	0,51b	5.268,65 b
Zona 3	6251.05 a	81.90 a	10.07 a	4.13 a	0.88 a	0,60 a	8.088,24 a

* médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de tukey a 5% de probabilidade de erro. ($p \leq 0,05$). MS= matéria seca da aveia preta; NA= nitrogênio acumulado na aveia preta; MgA= magnésio acumulado na aveia preta; MO= matéria orgânica; NGS5= NDVI gerado a partir do GreenSeeker no estágio R5 na cultura da soja; NR5= NDVI gerado a partir do RPAS no estágio R5 na cultura da soja; Ren= rendimentos de grãos da cultura da soja.

Mediante a avaliação entre as zonas de manejo definidas para a área de estudo segundo o método dos componentes principais (Figura 9) e a partir do algoritmo *fuzzy c-means* (Figura 11) para as variáveis MS, NA, MO, NR5, NGS5 e MgA, observou-se que de acordo com o mapa de zonas de manejo definidas o primeiro método, que as zonas de manejo 2, 3 e 4, estão presentes principalmente em uma faixa que vai do sul a leste do mapa e outra que vai de sudoeste a oeste do mapa e a zona de manejo 1 compreendeu-se em uma faixa que vai de sudoeste noroeste e nordeste (Figura 9) . Nas mesmas localizações na área de estudo das zonas de manejo 2, 3 e 4 definidas como o método dos componentes principais, foi localizada as zona de manejo 3 definidas a partir do algoritmo *fuzzy c-means*, sem que a zona de manejo 1 seria correspondente a zona de manejo 2 definida com o algoritmo *fuzzy c-means* (Figura 11). Esses resultados demonstram que apesar de serem diferentes quanto ao número de classes, as zonas de manejo definidas com o método dos componentes principais e com o algoritmo *fuzzy c-means*, apresentam semelhança, contudo o manejo nas zonas de manejo podem ser diferente mediante o escopo.

Quanto a comparação de medias (Tabela 11 e Tabela12), observou-se que as zonas de manejo delimitadas com o algoritmo *fuzzy c-means* foram mais eficazes em diferenciar as variáveis selecionadas que o método dos componentes principais.

De acordo com os mapas das variáveis inicialmente definidas (Figura 5), os mapas de zonas de manejo definidos com os dois métodos (Figura 9 e Figura 11) apresentaram grande semelhança com estes, sendo que a partir dos valores encontrados nesses mapas, se pressupõe que no mapa de zona de manejo, principalmente na zona 1 para o método dos componentes principais e a zona de manejo 2 definida com o algoritmo *fuzzy c-means* , poder-se-ia realizar uma intervenção a curto e a longo prazo na cultura da soja. A curto prazo medidas poderiam ser tomadas no momento da adubação a taxa variada e/ou fixa, onde por exemplo do N, um

ajuste poderia ser feito na adubação de base e/ou cobertura. A longo prazo no caso da MS, outras plantas poderiam ser utilizadas no esquema de rotação de inverno, sendo nesse caso, no ano seguinte, nas zonas de manejo 1 e 2 poderia ser utilizado aveia preta novamente, e nas demais zonas o nabo forrageiro, ou o consorcio deste com a própria aveia preta, para que com isso, espera-se que a variabilidade causada no inverno seja reduzida.

3.6 CONCLUSÕES

Foi constatado que a variabilidade da cultura de cobertura de inverno da aveia preta influenciou o rendimento da cultura de verão da soja.

A matéria seca da cultura da aveia preta, assim como os nutrientes acumulados referentes ao nitrogênio e o magnésio, foram as variáveis que apresentaram a maior influência no rendimento da soja.

Entre os atributos químicos do solo avaliados, a matéria orgânica foi a variável que mais influenciou no rendimento da soja.

O NDVI avaliado no estágio R5 da soja, tanto “por terra” com o GreenSeeker ou com o RPAS, foram eficientes em avaliar os efeitos da matéria seca e dos os nutrientes acumulados referentes ao nitrogênio e o magnésio da aveia preta no rendimento da soja.

O método realizado pelo algoritmo *fuzzy c-means*, foi mais eficaz na confecção das zonas de manejo que o método dos componentes principais.

3.7 AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Mestrado. Agradecer a empresa GEOCAMP em nome de Vinícius Luiz Eschner pelos vãos realizados com o RPAS e ao grupo Schaedler em nome de Eduardo Dauve e também de Eliseu José Schaedler pela área de estudo e os auxílios prestados durante os períodos de trabalho.

3.8 REFERENCAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 157-165, 2001.

ABREU, C. H. A.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 813-824, 2001.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 189-197, 2001.

ANJOS, L. H. C. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. In: KER, J. C. Et al. (Eds). **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.303-343, 2012.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BELLVERT, J. et al. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 15, p. 361-376, 2014.

BEZDEK, J. C. **Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**. Norwell: Kluwer: Academic Publishers, 1981. 256p.

BRESSAN, S. B. et al. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371-378, 2013.

BOER, C. A. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1269-1276, 2007.

BOKEN, V. K.; SHAYKEWICH, C. F. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based Normalized Difference Vegetation Index. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 20, p. 4155-68, 2002.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686p.

CALDERÓN, R. et al. Detection of downy mildew of opium poppy using high-resolution multi-spectral and thermal imagery acquired with an unmanned aerial vehicle. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 15, p. 369-661, 2014.

CARVALHO, A. M. et al. Soil fertility status, carbon and nitrogen stocks under cover crops and tillage regimes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 914-921, 2014.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1329-1339, 2007.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p. 1501-1511, 1994.

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.769-850, 2007.

CERRI, C. et al. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CUNHA, E. Q. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.

COSTA, M. S. S. M. et al. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **Campina Grande**, v. 15, n. 8, p. 810-815, 2011.

CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P. Nitrogen supply for cover crops and effects on peanut grown in succession under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, p. 41-46, 2009.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 481-489, 2008.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 375p.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n. 3, p.453-461, 2012.

DA ROS, C. O.; AITA, C. Efeito de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 135-140, 1996.

DUGO, V. G. et al. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 14, p. 660-678, 2013.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. **Fertility Research**, Amsterdam, v. 45, p. 91-100, 1996.

FU, W. et al. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 17, p. 121-135, 2015.

FERRAZ, G. A. E. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n. 1, p.140-150, 2012

FRIDGEN, J. J. et al. Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GRANADOS, F. L. et al. Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 17, p. 183-199, 2016.

GIOTTO, E.; ROBAINA, A. D. **A agricultura de precisão com o CR Campeiro 7**. Manual do usuário. Santa Maria: UFSM/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Rural/Laboratório de Geomática, 2007. 319p.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Sucessão de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 153-159, 2000.

HERNANDEZ, R. J.; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 79-85, 1998.

HEITHOLT, J. J.; FARR, J. B.; EASON, R. Planting configuration x cultivar effects on soybean production in low-yield environments. **Crop Science**, Madison, v. 45, p. 1800-1808, 2005.

JONES, J. R. et al. Influence of soil, crop residue, and sensor orientations on NDVI readings. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 16, p. 690-704, 2015.

KONDO, M. K. et al. Efeito de coberturas vegetais sobre os atributos físicos do solo e características agronômicas do sorgo granífero. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 33-40, 2012.

LIMA, J. S. S. et al. Análise espacial de atributos químicos do solo e da produção da cultura pimenta-do-reino (*Piper Nigrum*, L.). **IDESIA**, Arica, v. 28, n. 2, p. 31-39, 2010.

LOPRESTI, M. F.; DI BELLA, C. M.; DEGIOANNI, A. J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Processing in Agriculture**, Beijing, v. 2, p. 73-84, 2015.

LUDWIG, M. P. et al. Populações de plantas na cultura da soja em cultivares convencionais e Roundup ReadyTM. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n.3, p. 305-313, 2011.

MAZZILLI, S. R. et al. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v. 85, p. 22-30, 2015.

MELO, A. V. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 411-420, 2011.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.68, n. 3, p.386-392, 2011.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. A. Teores de nutrientes na folha e nos grãos de aveia-preta em função da adubação com fósforo e potássio. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p. 441-445, 2005.

- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied Linear Statistical Methods**. 2. ed. Illinois: Irwin Professional Publishing, 1985. 1152p.
- NETO, M. S. et al. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I - sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1013-1022, 2009.
- ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 2, p. 505-516, 1992.
- PASSARI, L. M. G. Z. et al. Estatística aplicada à química: dez dúvidas comuns. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 888-892, 2011.
- PERALTA, N. R. et al. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, p. 1-16, 2016.
- PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M.; VALE, D. W. Resposta da aveia preta à aplicação de fósforo sob duas doses de nitrogênio em condições de casa-de-vegetação. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 527-533, 2006.
- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343p.
- RAMBO L. et al. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 405-411, 2003.
- ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Versão 5.03. Beta, Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.
- ROZANE, D. E.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M. Deficiências de macronutrientes no estado nutricional da aveia preta cultivar comum. **Científica**, Jaboticabal, v.36, n. 2, p. 116-122, 2008.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/ Departamento de Solos, 2001. 41p. (Boletim Técnico 2).
- SANTOS, G. G. et al. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 115-122, 2008.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- SALVO, L.; HERNANDEZ, J.; ERNST, O. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, p. 116-122, 2010.
- SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SILVA, E. B.; COSTA, H. A. O.; FARNEZI, M. M. M. Acidez potencial estimada pelo método do pH SMP em solos da região do vale do Jequitinhonha no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 751-757, 2006.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

SULTANA, S. R. et al. Normalized Difference Vegetation Index as a Tool for Wheat Yield Estimation: A Case Study from Faisalabad, Pakistan. **The Scientific World Journal**, Cairo, v. 14, p. 1-8, 2014.

SOUZA, E. et al. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

TARNAVSKY, E.; GARRIGUES, S.; BROWN, M. E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v. 112, p. 535-549, 2008.

TEIXEIRA, E. I. et al. Sources of variability in the effectiveness of winter cover crops for mitigating N leaching. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 220, p. 226-235, 2016.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, 352p. p. 1-54.

YAN, L. et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in agriculture**, Amsterdam, v. 56, p. 174-186, 2007.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2007. 330p.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds). **Pedogenesis and Soil Taxonomy - I**. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, p.83-116, 1983.

ZHANG, X. et al. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 11, p. 103–114, 2010.

ZHITAO, Z.; LAN, Y.; PUTE, W.; WENTING, H. Model of soybean NDVI change based on time series. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v. 7, n. 5, 2014.

4 DISCUSSÃO

A utilização de zonas de manejo está sendo umas das principais alternativas para o manejo sustentável do sistema agrícola. As zonas de manejo são uma alternativa principalmente para áreas grandes que apresentam um histórico de manejo de longos anos. O principal tema de estudo atualmente para essa ferramenta, está no fato de quais variáveis utilizar no processo de confecção das zonas de manejo. No artigo I abordou-se sobre as duas principais variáveis para a delimitação das zonas de manejo, sendo esses os mapas de rendimento e por NDVI oriundos de imagens de satélite. Os mapas de rendimento foram utilizados como referência pois representam uma informação geral das condições de solo e clima e do manejo adotado. Já as imagens de satélite, por apresentar correlação com o rendimento (BOKEN e SHAYKEWICH, 2002; SULTANA et al., 2014; LOPRESTI et al., 2015; PERALTA et al., 2016) e pela maior facilidade de acesso aos dados.

Com os resultados obtidos no artigo I, observou-se que as zonas de manejo confeccionadas com o NDVI gerado com as imagens de satélite, apresentaram correlação com as zonas de manejo confeccionadas a partir dos mapas de rendimento, mostrando que o mesmo apresenta potencial de substituir os mapas de rendimento na confecção das zonas de manejo. Em outro aspecto o NDVI oriundo de imagens de satélites, pode integrar as variáveis utilizadas para a confecção de zonas de manejo, principalmente quando ao utilizar series temporais de mapas de rendimento, houver erros em algum mapa de rendimento e/ou não for possível obter o mesmo, pois é relativamente comum, ocorrerem contratemplos, como não gravar os dados de colheita no cartão de memória, defeitos no sistema de sensores de aquisição de dados, falhas dos operador entre outras (ARSLAN e COLVIN, 2002).

Nos testes com o NDVI oriundos de imagens de satélite em anos que não se possuía mapas de rendimento, foi observado que os mesmos apresentaram relação com o NDVI oriundos de imagens de satélite para cada mapa e rendimento e em consequência também com os mapas de rendimento. Apesar dessa relação, recomenda-se que principalmente para anos em que não se tenha disponível os mapas de rendimentos, deve-se ter informações referentes ao histórico de cultivo e manejo adotado na área e também das condições climáticas, pois essas informações poderão dar suporte a eventuais anomalias nos resultados. Ademais, não se recomenda a confecção de zonas com menos de três anos de resultados, tanto para os mapas de rendimento quando para o NDVI obtido com as imagens de satélite.

Com os resultados obtidos no artigo II, constatou-se que a cultura de cobertura de inverno influenciou o rendimento de grãos da cultura de verão, no caso desse estudo, a aveia preta influenciou o rendimento de grãos da cultura da soja.

Um aspecto importante de se destacar é que o NDVI realizado com por “por terra” com GreenSeeker ou com o RPAS foram eficazes em detectar as varrições de matéria seca e do N, P, K, Ca, Mg e C acumulados na aveia preta, o que representa uma ótima opção para o monitoramento dessa variabilidade no verão. Nesse caso, o NDVI realizado com o RPAS apresenta grande vantagem em relação ao NDVI realizado por “por terra” com GreenSeeker, pela maior facilidade de utilização e pela maior representação amostral com a possibilidade de maior número de amostragem. Além disso, o NDVI realizado com o RPAS apresentou boa correlação do NDVI com GreenSeeker “por terra”, o que indica que as leituras de NDVI realizadas com RPAS podem ser substituídas com as leituras de NDVI realizadas “por terra”.

Foi possível constatar que houve diferença entre os dois métodos utilizados para delimitar as zonas de manejo, em que o programa Management Zone Analyst (MZA) foi mais eficaz que o método dos componentes principais. Esse resultado indica que além da importância atribuída a escolha das variáveis que vão ser utilizadas na confecção das zonas de manejo, deve-se também levar em consideração sobre o método utilizado, o que interfere diretamente qualidade do resultado gerado.

Futuros estudos podem ser feitos buscando detectar diretamente na cultura de inverno a variabilidade de massa seca e de nutrientes acumulados, podendo-se assim, prever futuras intervenções a curto prazo já no inverno ou médio prazo no verão. Como visto neste estudo, o NDVI pode ser utilizado para esta finalidade, pois apresenta grande potencial em estimar o rendimento em massa seca em diversas culturas. Nesse sentido, apesar de ser a cultura de inverno mais amplamente utilizada em planos de rotação, além da aveia preta, este estudo pode ser realizado para outras culturas de cobertura de inverno e também para algumas culturas de cobertura de verão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADI, A. et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 400, p. 305-311, 2011.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARSLAN, S.; COLVIN, T. S. grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 3, p. 135-154, 2002.
- BATTE, M. T.; ARNHOLT, M. W. Precision farming adoption and use in Ohio: case studies of six leading-edge adopters. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 38, p. 125-139, 2003.
- BOKEN, V. K.; SHAYKEWICH, C. F. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based Normalized Difference Vegetation Index. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 20, p. 4155-68, 2002.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 92, p. 79-97, 2014.
- CUNHA, E. Q. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.
- DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and n fertilisation. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 268, p. 319-328, 2005.
- DWYER, L. M. et al. A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, p. 505-509, 1991.
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: 03 mai. 2015.
- FREITAS, R. M. et al. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, São José dos Campos, v. 2, p. 57-68, 2011.
- GLOBAL SOIL FORUM. **Dedicated to achieving responsible land governance and sustainable soil management worldwide**. 2016. Disponível em: <<http://www.iass-potsdam.de/en/research-clusters/global-contract-sustainability/sustainability-governance/global-soil-forum>>. Acesso em: 03 dez. 2016.
- LIN, J. Y. Education and Innovation Adoption in Agriculture: Evidence from Hybrid Rice in China. **American Journal of Agricultural Economics**, Oxford, v. 73, n. 3, p. 713-723, 1990.

LOPRESTI, M. F.; DI BELLA, C. M.; DEGIOANNI, A. J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Processing in Agriculture**, Beijing, v. 2, p. 73-84, 2015.

NELSON, R. R.; PHELPS, E. S. Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth. **The American Economic Review**, Nashvill, v. 56, n. 1/2, p. 69-75, 1966.

PERALTA, N. R. et al. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, p. 1-16, 2016.

RAMOS, S. F. et al. Reflexões acerca das nanotecnologias e as novas densidades técnicas-científicas informacionais na agricultura. **Estudios Sociales**, Hermosillo, v. 17, n. 34, 2009.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, 2012.

ROBERTS, R. K. et al. **Economic Evaluation of Variable Rate Nitrogen Application on Cotton**. Milan No-Till Field Days: University of Tennessee Institute of Agriculture, 1999.

SANTOS, G. G. et al. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 115-122, 2008.

SULTANA, S. R. et al. Normalized Difference Vegetation Index as a Tool for Wheat Yield Estimation: A Case Study from Faisalabad, Pakistan. **The Scientific World Journal**, Cairo, v. 14, p. 1-8, 2014.

VALENTE, J. et al. An Air-Ground Wireless Sensor Network for Crop Monitoring. **Sensors**, Basel, v. 11, p. 6088-6108, 2011.