

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**INTER-RELAÇÕES DE ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM
LATOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO DO CERRADO BRASILEIRO COM A
PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max*- L. Merrill) SOB PLANTIO
DIRETO**

LUIS FERNANDO CUNHA OLIVEIRA

Engenheiro Agrônomo

CHAPADÃO DO SUL

ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

JUNHO / 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**INTER-RELAÇÕES DE ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM
LATOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO DO CERRADO BRASILEIRO COM A
PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max*- L. Merrill) SOB PLANTIO
DIRETO**

LUIS FERNANDO CUNHA OLIVEIRA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul para obtenção do
título de MESTRE EM AGRONOMIA,
área de concentração: Produção
Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL- MS

JUNHO / 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

A ficha catalográfica será elaborada pelo bibliotecário do CPCS inserida atrás da folha de rosto



Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Câmpus de Chapadão do Sul

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: LUIS FERNANDO CUNHA DE OLIVEIRA
ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Morel de Passos e Carvalho

**INTER-RELAÇÕES DE ATRIBUTOS FÍSICOS-QUÍMICOS DE UM
LATOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO DO CERRADO BRASILEIRO
COM A PRODUTIVIDADE DE SOJA (GLYCINE MAX-L. MERRIL)
SOB PLANTIO DIRETO**

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Morel de Passos e Carvalho

Prof.(a) Dr.(a) Cassiano Garcia Roque

Prof.(a) Dr.(a) Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Chapadão do Sul, 02 de Junho de 2015.

Aos meus filhos,
frutos da aleatoriedade,
Fernando e Luis Alberto, e
a quem ainda não conheço, Ana Laura.
Em especial, à Neiva Maria Tonon
Dedico e Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. Morel de Passos e Carvalho pelos valiosos ensinamentos acadêmicos, dedicação, bom humor, críticas e amizade.

Ao professor Dr. Cassiano Roque por sua valiosa amizade, ajuda em trabalhos de campo e constante colaboração desde a minha entrada no mestrado até a conclusão do curso.

Ao professor Dr. Fábio Henrique Baio, por suas idéias de pesquisa e por ter compartilhado seus conhecimentos de agricultura de precisão.

Ao professor Dr. Wilson Itamar Maruyama da UEMS- Cassilândia/MS, pela amizade, confiança e aprendizagens nos seminários realizados em sua disciplina de Experimentação Agrícola.

A prof^a Dra. Ana Carina Cândido (UFMS) pelo curso de Redação Científica; aos professores colaboradores Dr. Antônio Carlos Gonçalves (UEM), Dr. Cássio Tormena (UEM), Dr Eduardo Caires (UPG) e a prof^a Dr^a Marlene Cristina Alves (UNESP) da disciplina de física do solo.

Aos professores Drs. Everton Neiro e Msc. Cid Campos pelas correções do trabalho de qualificação acadêmica e ao professor Dr. Rafael Montanari da UNESP, pela colaboração na apresentação de meu trabalho no IV SGEA de Botucatu/SP.

Também devo meus agradecimentos a química Mônica Cristina Borges e ao técnico Kênio Batista Nogueira do Laboratório de Solos da UFMS, pela ajuda, orientações e acompanhamento das análises laboratoriais do estudo.

A todos os professores da UFMS do Programa de Pós Graduação em Agronomia do câmpus de Chapadão do Sul, que foram indispensáveis para o meu crescimento profissional e intelectual. Aos colegas do mestrado, pela oportunidade de ter compartilhado um pouco de nossos caminhos juntos.

A minha família, pelo incentivo e porque faz parte da minha história de vida.

Por fim, meu muito obrigado, a todos os colaboradores que contribuíram com meu trabalho, e que sempre desejaram meu bem, pois acredito que somos a soma das pessoas com quem convivemos a nossa volta.

EPÍGRAFE

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos. ” Fernando Pessoa.

OLIVEIRA, L. F. C. de. Inter-relações de atributos físico-químicos de um LATOSSOLO BRUNO Distrófico do Cerrado Brasileiro com a produtividade da soja (*Glycine max*- L. Merrill) sob plantio direto. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2015.

RESUMO

Conhecer os efeitos dos atributos do solo sobre a produtividade agrícola deve ser a base para que seja definido um adequado manejo ao sistema de agricultura de precisão. Atualmente, a utilização dessa ferramenta de gestão tem se limitado ao mapeamento de atributos químicos do solo, não levando em conta a interação deles entre si, nem com os demais fatores que condicionam a produtividade vegetal. O objetivo do trabalho foi selecionar, entre os atributos físico-químicos pesquisados do solo, aquele que melhor se apresenta para explicar a variabilidade da produtividade espacial de soja, com vistas a se estabelecer zonas específicas de manejo agrícola. O estudo foi realizado no ano agrícola 2012/13 em uma área de Latossolo Bruno distrófico, relevo plano, município de Costa Rica, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil (18°08'09" S; 53°16'06" W). Tal área vem sendo cultivada em plantio direto com a sucessão soja/milho safrinha sob agricultura de precisão. Para tanto, foi instalada a malha geoestatística para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 131 pontos amostrais georreferenciados numa área de 52,4 ha. Do ponto de vista linear e espacial, a produtividade de grãos de soja foi explicada na razão inversa dos teores de cálcio e da soma de bases do solo. Isso porque, os elevados teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e da soma de bases observados no solo, sobretudo em virtude de excessivas calagens anteriores, proporcionaram um desbalanço das relações Ca/Mg , Ca/K e Mg/K , e possível diminuição dos teores de micronutrientes disponíveis. Nos sítios onde ocorreram os maiores teores de cálcio e da soma de bases verificaram-se as menores produtividades de grãos de soja, sendo o inverso perfeitamente válido. Portanto, ainda que de forma inversa, os teores de cálcio e da soma de bases do solo pesquisado constituíram-se nos atributos determinantes das zonas específicas de manejo que explicam a produtividade de grãos de soja local.

Palavras-chave: manejo do solo, agricultura de precisão, balanço catiônico

OLIVEIRA, L. F. C. de. Interrelationships of physical and chemical attributes of an Oxisol the Brazilian Cerrado with soybean yield (*Glycine max* - L. - Merrill) under no-tillage. 2015. 83 f. Dissertation (MS in Agronomy) - Federal University of Mato Grosso do Sul, in 2015.

ABSTRACT

Knowing the effects of soil properties on agricultural productivity should be the basis to define a proper management to precision farming system. Currently, the use of this management tool has been limited to mapping soil chemical properties, not taking into account their interaction with each other or with other factors that affect plant productivity. The objective of this study was to select, between the physical and chemical attributes investigated in the soil, the one that best explains the variability of spatial soybean yield, in order to establish specific areas of farm management. The work was conducted in the agricultural year of 2012/13 in an area of Oxisol, flat relief, municipality of Costa Rica, state of Mato Grosso do Sul, Brazil (18°08'09 " S; 53°16'06 " W). The area has been cultivated with soybeans and second harvest corn under direct sowing and precision agriculture. For this purpose, a geostatistical grid was installed to collect soil and plant data, containing 131 georeferenced sample points in a 52.4 ha area. From the linear and spatial point of view, the productivity of soybeans was explained in inverse relation to the calcium and the sum of the soil bases. This is because, the high Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} and the sum of bases observed in the soil, especially due to excessive preceding liming, provided an imbalance of ratios of Ca/Mg, Ca/K and Mg/K and possible reduction of available micronutrient levels. In sites where the greatest levels of calcium and total bases there were smaller yield of soybeans occurred, being perfectly valid reverse. Therefore, although inversely, the calcium content and the sum of bases of the soils constituted the determining attributes of the specific areas of management that best explain the productivity of local soybeans.

Keywords: soil management, precision agriculture, cationic balance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Semivariograma teórico.....	32
Figura 2: Caracterização do cultivo na área de estudo	35
Figura 3: Precipitação mensal (mm) no período de estudo	36
Figura 4: Caracterização inicial do solo na área de estudo	36
Figura 5: Implantação da malha de amostragem do solo.....	38
Figura 6: Mapas da produtividade de soja na área de estudo.....	41
Figura 7: Histograma e teste de normalidade dos dados originais de (NC)	47
Figura 8: Histograma e teste de normalidade dos dados originais de (RP1) ...	49
Figura 9: Histograma e normalidade da produtividade de grãos	51
Figura 10: Equações de Regressão de Ca1 X Prod e SB1 X Produtividade....	54
Figura 11: Representação gráfica de ajuste dos semivariogramas simples.....	57
Figura 12: Representação gráfica de ajuste das validações cruzadas.....	60
Figura 13: Mapas de krigagem.....	62
Figura 14: Semivariogramas cruzados dos atributos de interesse	64
Figura 15: Validação cruzada dos semivariogramas cruzados	65
Figura 16: Mapas de cokrigagem	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atributos físicos do perfil de tradagem do Latossolo Bruno Distrófico na área de estudo	37
Tabela 2: Atributos químicos do perfil de tradagem do Latossolo Bruno Distrófico na área de estudo	37
Tabela 3: Estatística descritiva de atributos químicos do solo na área de pesquisa.....	44
Tabela 4: Estatística descritiva de atributos físicos do solo na área de estudo....	48
Tabela 5: Análise de produtividade de grãos (kg ha^{-1}) na área de estudo	50
Tabela 6: Matriz de correlação de Pearson de atributos químicos (I) do solo na área de estudo	51
Tabela 7: Matriz de correlação de Pearson de atributos químicos (II) do solo na área de estudo	52
Tabela 8: Matriz de correlação de Pearson de atributos físicos do solo na área de estudo	53
Tabela 9: Análise semivariográfica da produtividade de grãos e dos atributos de solo na área de estudo	55
Figura 10: Parâmetros de semivariogramas cruzados e validação cruzada de atributos de solo com maiores correlações com a produtividade de grãos	64

SUMÁRIO

RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 A Cultura da soja no Cerrado.....	16
2.2 Solos do Cerrado.....	16
2.3 Atributos químicos dos solos do Cerrado.....	17
2.4 Atributos físicos dos solos do Cerrado.....	19
2.4.1 Textura do solo.....	20
2.4.2 Umidade do solo.....	20
2.4.3 Densidade do solo.....	21
2.4.4 Densidade da partícula.....	21
2.4.5 Compactação do solo.....	21
2.4.6 Resistência a penetração de raízes.....	22
2.4.7 Porosidade total.....	23
2.4.8 Densidade Relativa do solo.....	24
2.5 Uso e manejo dos solos no Cerrado.....	25
2.6 A calagem no plantio direto.....	26
2.7 A geoestatística na agricultura de precisão.....	30
2.7.1 O semivariograma.....	30
2.7.2 A krigagem ordinária.....	32
2.7.3 Dependência espacial de atributos de solo e da planta.....	33
2.7.4 Semivariogramas cruzados e cokrigagem.....	34
3 MATERIALE MÉTODOS.....	35
3.1 Descrição da área de estudo.....	35
3.2 Classificação inicial do solo da área de estudo.....	36
3.3 Implantação da malha de amostragem.....	38
3.4 Condução técnica da cultura de soja.....	38
3.5 Metodologias de determinação dos atributos pesquisados.....	39
3.5.1 Análises Químicas.....	39
3.5.2 Análises físicas.....	40
3.5.3 Análise da produtividade de grãos.....	40

3.6. Análise estatística	42
3.6.1 Análise estatística descritiva	42
3.6.2 Análise de regressão	42
3.7. Análise geoestatística	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Análise estatística descritiva dos dados	44
4.2. Atributos químicos de solo	44
4.2.1 Média	44
4.2.2 Variabilidade	45
4.2.3 Distribuição de frequências	46
4.3. Atributos físicos de solo	47
4.3.1 Média	48
4.3.2 Variabilidade	48
4.3.3 Distribuição de frequências	49
4.4. Atributo de planta	49
4.4.1 Média	50
4.4.2 Variabilidade	50
4.4.3 Distribuição de frequências	50
4.5. Análise de Regressão entre os atributos	51
4.5.1 Atributos químicos de solo x atributo de planta	51
4.5.2 Atributos físicos de solo x atributo de planta	52
4.5.3 Equações lineares de regressão	54
4.6. Análise geoestatística dos atributos do estudo	54
4.6.1 Semivariogramas simples	54
4.6.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples	59
4.6.3 Mapas de krigagem	61
4.6.4 Semivariogramas cruzados e cokrigagem	63
4.6.5 Validação cruzada dos semivariogramas cruzados	65
4.6.6 Mapas de cokrigagem	66
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da ciência agrônômica, tem sido cada vez mais evidente a máxima de que todo solo produtivo é um solo fértil, mas nem todo solo fértil é necessariamente produtivo.

A visão abrangente de fertilidade do solo vem ganhando espaço sobre o conceito tradicional na agricultura, o de um enfoque exclusivamente químico. A atual visão sistêmica reforça o entendimento de que a produtividade agrícola é o resultado da integração da fração química, física e biológica do solo e não efeito de seus atributos isolados sob determinado manejo e clima. (Addiscot., 1995; Mielniczuk et al., 2003; Vezzani et al., 2009). Tal avaliação é compartilhada por Anghiononi et al (1998), que enfatizam que as relações entre atributos do solo são mais importantes que os valores absolutos.

O enfoque químico foi importante na construção da fertilidade do solo no Cerrado a partir da década de 70. Assim, áreas inférteis, ácidas e pobres em nutrientes foram transformadas em campos férteis, com produtividades agrícolas tão altas quanto as lavouras no Centro-Sul do país.

Essa transformação não se deu sem que houvesse intensivo preparo do solo, predomínio de monocultivo e massivo emprego de fertilizantes e corretivos (REATTO et al., 2006). Tal processo foi embasado no conceito vigente químico-mineralista, onde a fertilidade é expressa pela habilidade do solo em fornecer nutrientes essenciais, em quantidades e proporções adequadas para crescimento das plantas, sem a presença de elementos tóxicos (SSSA, 1985; SBCS, 2004).

Apesar da melhoria de atributos químicos de solo, o excesso de grade, operações inadequadas às características de cada solo ou mesmo do teor ideal de umidade ao tráfego de máquinas, somado a pouca adição de palha ou de restos culturais, têm ocasionado diversos prejuízos à estrutura aos solos (SÁ et al, 2004). Exemplo significativo da falta de cuidados aos solos do Cerrado é a atual forma de condução do plantio direto, onde em grande parte

das lavouras, o sistema vem sendo realizado sob “restos diretos” sem rotação de culturas, condição básica para o sucesso do empreendimento (SOUZA et al., 2004).

Sob estes aspectos, considera-se a necessidade de uma nova abordagem que trabalhe o solo sob uma forma mais ampla de manejo, incluindo não só atributos químicos mas também físicos de solo, selecionando os que mais respondem ao uso e manejo do solo e que podem causar mais impactos na variabilidade de produtividade dos cultivos (LARSON & PIERRE, 1994).

Para tanto, o trabalho enfatizou as análises usuais de atributos químicos e as determinações físicas de solo. Dentro dessas últimas, a densidade de solo (D_s), densidade da partícula (D_p), umidade gravimétrica e volumétrica do solo (US_{grav} e US_{vol}), porosidade total (P_t), resistência mecânica à penetração (R_p) e a textura do solo constituem um conjunto de análises que podem ser facilmente selecionadas pela facilidade de uso, rapidez de execução e grau de interação com os atributos químicos de solo.

O grande desafio nesse tipo de estudo envolvendo constituintes da fertilidade do solo é verificar a importância de cada atributo e de suas interações na produtividade agrícola. Como exemplo dessas interações, a correção de acidez de solo é uma das práticas que mais influencia a fertilidade do solo, com efeito direto no equilíbrio de bases trocáveis e na produtividade.

Para melhor compreender os efeitos dos atributos físico-químicos e suas interações no solo e com as plantas, o uso de regressão linear e das técnicas geoestatísticas (análise semivariográfica, krigagem e cokrigagem), em conjunto com mapas de produtividade, constituem estratégias úteis para melhor interpretar as causas de variabilidade de produtividade dos cultivos em áreas de plantio direto e agricultura de precisão.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar entre os atributos químicos e físicos analisados, os que melhor explicam a variabilidade da produtividade de soja na área de estudo configurando as zonas específicas de manejo agrícola.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja no Cerrado

A cultura de soja foi introduzida no Cerrado por conta de sua rusticidade, crédito subsidiado, preços favoráveis, fomento à pesquisa, à mecanização agrícola e massivo uso de fertilizantes e pesticidas.

O cultivo de soja nas áreas de Cerrado, como outras atividades agrícolas na região, tem se caracterizado por um sistema intensivo de produção, com excessiva mecanização agrícola, além de elevadas doses de fertilizantes e defensivos agrícolas, visando altas produtividades (REATTO, A 2006).

A manutenção contínua desse sistema de exploração agrícola tem levado os solos do Cerrado a sua degradação química, física e ambiental. Isso também se verifica nas áreas de plantio direto. O cultivo contínuo da soja na mesma área resulta num decréscimo da produtividade agrícola, devido ao aumento da incidência de pragas e doenças, aumento de plantas daninhas específicas, acúmulo de substâncias tóxicas, diminuição do desenvolvimento do sistema radicular e da disponibilidade de nutrientes (DERPSCH et al., 1991).

Para Salvador et al. (2002), a produtividade da soja depende das condições físicas, químicas e biológicas do solo, bem como dos fatores climáticos, tais como a quantidade e distribuição de chuvas durante o seu período de crescimento. Desenvolver sistemas conservacionistas que contemplem esses fatores é de extrema importância para assegurar maior produtividade dos cultivos.

2.2 Solos do Cerrado

O Cerrado possui sete classes principais de solos, com porcentagem de ocorrências diversas (EMBRAPA, 2013). Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de solos, a região é composta pelas seguintes classes:

Latossolos, Nitossolos Vermelhos, Neossolos Quartzarênicos, Cambiossolos, Gleissolos e os Plintossolos.

Dentro dessa classificação, os Latossolos representam 46% do Bioma Cerrado (REATTO et al., 1998). Estão predominantes sobre vegetação natural de Cerradão, Cerrado Denso ou Cerrado Restrito, ocupando na paisagem a superfície dos chapadões e as partes planas entre essas chapadas. De acordo com os mesmos autores, os Latossolos são solos minerais, não hidromórficos, profundos (geralmente mais de 2m). Na escala do tempo, são os últimos solos a serem formados, com baixa quantidade de sílica e bases trocáveis, provocada pelo intemperismo acentuado dos minerais. Em função disso, os Latossolos são enriquecidos com óxidos de Fe e Al, agentes de agregação que dão a massa do solo, aspecto maciço poroso e estrutura laminar muito pequena.

Segundo o autor anterior, dentre os Latossolos, são incluídos os Latossolos Brunos, distróficos, com relação textural abaixo de 1,40. São solos profundos, saturação de bases menor do que 50% e elevados teores de argila.

2.3 Atributos químicos dos solos do Cerrado

Os Latossolos representam a maior parte dos solos do Cerrado, e em seu estado natural possuem baixa fertilidade natural para uso agrícola. Cerca de 95% deste agrupamento de solos são distróficos e ácidos, com pH (H_2O) na faixa de 4,0 a 4,5 (REATTO et al., 1998). Para produzir boas colheitas, exigem, entre outras práticas, cultivares adaptadas, época propícia de plantio, manejo adequado de solo e aplicações de fertilizantes e corretivos.

A limitação da fertilidade química dos Latossolos do Cerrado é expressa pela baixa capacidade de troca de cátions (CTC), resultado dos agentes de intemperismo nos solos tropicais. A CTC pode ser melhorada por adição de matéria orgânica, uma vez que a CTC é altamente dependente desse constituinte (RAIJ; PEECH, 1972). A matéria orgânica (MOS) possui 58% de carbono, seu principal componente. Bayer & Mielniczuk (1997) encontraram uma relação linear positiva entre o carbono total e a CTC. Souza

et al., (2003) ressaltam que a matéria orgânica (MOS) é responsável por até 85% da CTC dos solos de Cerrado.

Além dos baixos teores de matéria orgânica, os solos do Cerrado, em sua condição natural, são ácidos, com baixa reservas de nutrientes e elevada capacidade de fixação de fósforo, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (RESENDE et al, 1995).

Em relação a essa disponibilidade de P, a metodologia da resina trocadora de íons tem demonstrado ser mais adequada na classificação dos teores de P disponível em análises de solo, quando comparada ao método tradicional de Mehlich I, em que se leva em conta o teor de argila (FUNDAÇÃO CHAPADÃO, 2008).

A escolha da resina é justificada, porque o extrator ácido de Mehlich superestima valores de P disponível das amostras, particularmente, nas situações em que foram empregados fosfatos naturais na abertura das áreas do Cerrado (CAIRES, 2008).

Souza et al (2006) propuseram uma nova forma para cálculo da quantidade de adubação fosfatada corretiva em solos de cerrado. Esta nova fórmula baseia-se na capacidade tampão de fósforo (necessidade de adição de P_2O_5 para elevação do teor de P no solo em uma unidade), acima de um valor considerado crítico. Esse valor está correlacionado com o teor de argila presente no mesmo solo.

Quando a análise de solo apresentar teores médios ou adequados de P pode-se utilizar apenas a adubação de manutenção de $20 \text{ kg ha}^{-1} P_2O_5$ para cada tonelada de grãos de soja almejada (17 sc ha^{-1}), aproximadamente $1,18 \text{ kg.ha}^{-1} P_2O_5$ por saco de soja desejado. (SOUZA, 2004). Para a cultura do milho, Alves et al (1999) recomendam 10 kg ha^{-1} de P_2O_5 por tonelada/grãos prevista.

A forma preferencial de aplicação de fósforo deve ser realizada no sulco de semeadura, através do sistema de haste, popularmente conhecido como “botinha”, permitindo o desenvolvimento do sistema radicular em

profundidade, melhorando o aproveitamento de água e nutrientes (LEAL et al, 2008).

A exemplo do fósforo, a análise de solo também é uma ferramenta útil à adubação potássica. De acordo com Coelho, A.M. (2005), aumentos de produção em função da aplicação de potássio têm sido observadas para solos com teores muito baixos e com doses de até 120 kg de K_2O ha^{-1} . Os solos do Brasil Central, em sua condição natural apresentam uma quantidade de potássio disponível normalmente baixa e a adubação corretiva com esse elemento produz resultados compensadores.

Em solos com fertilidade construída, quando teor de potássio no solo for considerado bom (>50 mg.dm⁻³), recomenda-se a adubação de manutenção, que é baseada na expectativa de produção da cultura. Assim, se a expectativa for de 4,0 t ha^{-1} de grãos (66,7 sc ha^{-1}) na soja, deve-se aplicar 80 kg ha^{-1} de K_2O como adubação de reposição para manter o teor de K no solo (SOUZA e LOBATO, 2004).

Na adubação potássica de manutenção na cultura do milho, para produtividades inferiores a 6,0 t de grãos ha^{-1} , tem-se uma exportação média ao redor de 4 kg de K_2O por tonelada de grãos; e para produtividades acima de 8,0 ton de grãos ha^{-1} de 6 kg de K_2O por tonelada de grãos planejada. Em milho para silagem, a extração média é de 13 kg de K_2O por tonelada de matéria seca produzida (COELHO, 2005).

2.4 Atributos físicos dos solos do Cerrado

Quando os teores de nutrientes estiverem em níveis suficientes e as correlações com as produtividades forem baixas, os demais atributos do solo, particularmente os físicos, devem ser investigados (VIANA, 2005).

Essa citação reflete a agricultura no Cerrado. Apesar da melhoria da fertilidade química de solo, sistemas intensivos de produção e práticas inadequadas de manejo causaram severos impactos aos solos da região.

Isso é particularmente importante em Latossolos de textura argilosa a muito argilosa. Quando intensamente trabalhados ou cultivados fora de

condições apropriadas tem sua estrutura alterada, com redução da porosidade do solo e a formação de camadas compactadas, dificultando o enraizamento e a infiltração de água (OLIVEIRA et al., 1989). Esses efeitos são influenciados pela textura do solo e têm grandes relações com a nutrição de plantas.

2.4.1 Textura do solo

Diversos trabalhos ressaltam que, de maneira geral, em solos medianamente ou bem intemperizados, há melhoria da parte física do solo com o aumento do teor de argila. Reconhecidamente, há um grupo de propriedades do solo que são diretamente ou indiretamente influenciados pela textura. Assim, solos arenosos tem maior infiltração de água e menor compactação.

No Cerrado, o paradigma anterior concebido em décadas passadas, estabelecia severas restrições ao uso agrícola destes solos, principalmente devido a susceptibilidade à erosão, à baixa capacidade de retenção de água e à limitada reserva de nutrientes. Isso vem sendo superado por sistemas com mínimo revolvimento do solo, plantio direto e plantas de cobertura (PEDROTTI, A. et al., 2009).

2.4.2 Umidade do solo

Em virtude da complexa interação de fatores físicos, em cada condição estrutural do solo, existe uma faixa ótima de umidade que favorece o crescimento vegetal (LETEY, 1985).

O aumento na umidade do solo causa decréscimo na sua aeração e resistência a penetração. O primeiro efeito é indesejável quando abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor que limita o processo de respiração e as trocas gasosas (TORMENA et al., 1998). Para a cultura do trigo, Lipiec (2003), apresentou valores limitantes desde de $0,021$ até $0,145 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Para Pedrotti et al. (2001), o conteúdo de água, oxigênio, temperatura e resistência mecânica afetam diretamente o crescimento das plantas e que somados a disponibilidades de nutrientes, praticamente

constituem os mais importantes parâmetros do solo relacionados diretamente com a produtividade dos cultivos de sequeiro.

2.4.3 Densidade do solo

Diversos pesquisadores relatam que de modo geral o solo sob plantio direto apresenta valores de densidade mais elevada (WOORHEES e LINDSTRIM, 1993; SIDIRAS et al., 1984; VIEIRA, 1985; KLEIN e BOLLER, 1995). No entanto, os autores salientam que é complicado associar valores de densidade do solo com o crescimento vegetal, uma vez que esses valores variam de solo para solo em função de sua textura.

Para uma adequada avaliação da densidade do solo, deve-se comparar os valores obtidos com outras áreas sem compactação, preferencialmente com o mesmo teor de umidade, tipo de solo e relevo (MENDES et al., 2006). Esse cuidado evita erros de análises, como por exemplo, no caso de uma densidade de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ que em um solo argiloso traduz alta compactação, enquanto que o mesmo valor em uma textura arenosa, pode significar um solo solto.

2.4.4 Densidade de partícula

Outro atributo avaliado no atual trabalho foi a densidade de partículas, característica intrínseca do solo, dependente apenas dos constituintes da fração sólida do solo e determinada pela proporção relativa do material mineral e orgânico e suas respectivas densidades. Pelo fato da densidade da matéria orgânica variar de 1,0 a $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$ (FERREIRA & DIAS JÚNIOR, 1996), valores próximos a estes podem indicar dominância de partículas orgânicas ou minerais em sua fase sólida (MENDES et al., 2006).

2.4.5 A compactação do solo

A densidade do solo não é o fator mais importante que limita o crescimento das plantas, segundo alguns autores. Para estes, a compactação do solo é um problema que exige cuidados no manejo de solos.

A compactação não só reduz a capacidade de infiltração de água no solo, mas também o volume de água perdido por escoamento superficial. Estudos realizados em solos compactados sob o SPD, mostram que as perdas de água por escoamento superficial podem chegar a 70%, considerando uma chuva de 64 mm/h. Isso significa que, de 64 mm de chuva, 45 mm podem ser perdidos por escoamento superficial em um solo fisicamente degradado. Esse valor corresponde a quantidade de água consumida por uma lavoura de soja em florescimento pleno durante um período aproximado de uma semana (VOLK et al., 2006).

A compactação ocasiona redução dos poros no solo e o efeito negativo dessa redução sobre o desenvolvimento das plantas, ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas (STEPNIESWSKI et al., (1994). Além disso, provoca alterações em outras propriedades do solo, como a redução das trocas gasosas e o favorecimento do encharcamento temporário, que reduz a infiltração e altera a absorção de nutrientes (LIMA et al., 2006).

Mas o efeito da compactação não se restringe apenas a esses atributos. Afeta de igual forma, a porosidade e a resistência mecânica à penetração de raízes.

2.4.6 Resistência à penetração de raízes

A caracterização da compactação pode ser determinada através da penetrometria. No entanto, o uso de penetrômetros com índice de cone apresenta limitações, uma vez que medições em solo seco, podem fornecer valores elevados, dando um falso diagnóstico de compactação, em contraposição a valores de índice de cone muito baixos, na condição de solos úmidos (BUSSCHER et al., 1997). Neste sentido, os valores de campo obtidos com penetrômetros devem ser tomados próximos à capacidade de campo.

Os valores acima de 2 MPa são mais aceitos como críticos de resistência do solo à penetração de raízes. Esses valores devem ser

tomados apenas como uma referência, uma vez que existe flexibilidade de 2 a 5 MPa.

Em revisão de Reinert et al. (2001), os autores observaram que resistência a penetração de 2,8 a 3,2 MPa retarda a elongação de raízes e acima de 4,0 MPa interromperia o crescimento das mesmas.

Sá et al. (2006), consideraram limitantes ao crescimento radicular valores de 2 MPa para culturas anuais; 2.5 MPA para pastagens e 3 MPA para espécies arbóreas. No entanto, Beutler e Centurion (2003) observaram redução da produtividade da soja entre 1.66 MPa e 3.05 MPa, dependendo do cultivar.

Tavares Filho et al. (2001) mostraram que tais valores de resistência, quando superiores a 3,5 MPa, não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, influenciando apenas sua morfologia.

Em contraponto aos resultados anteriores, diversos trabalhos relatam que produção vegetal não é afetada em solos com alta resistência à penetração, pelo fato das raízes crescerem ao longo dos biosporos, formados pela meso e macrofauna e raízes mortas (WILLIAMS; WEIL, 2004).

2.4.7 Porosidade total

A porosidade, fração do volume ocupado com solução e ar do solo, é de grande importância aos processos físicos, químicos e biológicos, como infiltração, drenagem, retenção de água, difusão de nutrientes, crescimento de microrganismos, raízes e pelos absorventes (BOUMA, 1991, MOREIRA E SIQUEIRA, 2002).

O aumento na densidade do solo e de sua resistência mecânica é acompanhado pela diminuição na porosidade total, no tamanho e na continuidade dos poros (MORAES, 1984; ROSA JÚNIOR, 1984; SILVA et al., 1986).

Em geral, segundo Hillel (1998), reduções significativas ocorrem principalmente nos volumes dos macroporos, enquanto os microporos permanecem quase inalterados. Conforme KERTZMANN (1996), a diminuição

na macroporosidade faz com que a água que fica retida nos microporos atinja altas tensões, tornando-se indisponível para as plantas.

Existe uma estreita relação entre a porosidade do solo e o crescimento radicular, com maior crescimento de raízes onde há maior número e continuidade de macroporos (HATANO et al., 1988). As raízes diminuem de diâmetro para penetrar pequenos poros, pois a resistência mecânica do solo estimula a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas (RUSSEL; GOSS, 1974).

Diversos estudos relatam que as plantas apenas conseguem desenvolver-se quando a porosidade de aeração no solo está acima de 10%, favorecendo a renovação de ar do solo (KIEHL et al., 1979).

2.4.8 Densidade relativa do solo

Frente a ampla variação de valores de resistência à penetração de raízes (R_p) estabelecidos como críticos, e visando isolar as imperfeições desta metodologia, esforços foram realizados para desenvolver o conceito da densidade relativa (D_R).

A densidade relativa (D_R) é calculada pela relação entre a densidade do solo obtida no campo (D_s) e a densidade máxima obtida em amostra compactada (D_{MS}) por um teste de Proctor (HÄKANSSON e LIPIEC, 1990).

A (D_{MS}) é afetada pela textura e pelo teor de matéria orgânica do solo, daí a razão para que seja determinada para cada solo em estudo, pois a máxima densidade e a densidade ótima no campo ou aquela limitante para o pleno desenvolvimento das plantas será dependente desses fatores (MARCOLAN, 2006).

De acordo com essa proposição, a produtividade agrícola aumenta até certo grau de compactação, valor a partir do qual começa a diminuir. Santos et al. (2005) comprovaram que a máxima produção de milho aumentou até um grau de compactação de 72% em Neossolo Quatzarênico e de 65% para um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (365 g. kg⁻¹ de argila).

2.5. Uso e Manejo dos solos do Cerrado

O manejo conservacionista do solo é a base de sustentação dos sistemas agrícolas. A insustentabilidade do preparo convencional estimulou os agricultores a adotar o sistema de plantio direto. Introduzido inicialmente como uma alternativa para controle da erosão nas lavouras do Sul do Brasil, esse sistema teve rápida expansão na condição de solos tropicais (COSTA & THOMAS, 2010).

Apesar de todos os conhecidos benefícios do plantio direto e de sua ampla participação nas áreas de Cerrado (MÜLLER, 2003), o sistema na maior parte da região vem sendo realizado sem qualidade, limitado a semeadura direta, o que pode comprometer o sucesso do sistema, o potencial produtivo dos solos e a estabilidade da agricultura regional.

Dentre os principais obstáculos que o sistema enfrenta nas áreas de Cerrado, pode ser destacado a baixa produção de palha durante o período de entressafra. Essa baixa produção de palha é essencialmente associada com períodos de seca que ocorrem, normalmente, de abril a setembro.

Como consequência, diversas áreas permanecem sem ou com pouca cobertura vegetal até sete meses, o que representa sérias dificuldades a um sistema que tem sua eficácia sustentada, dentre outros fatores, por razoável aporte de resíduos culturais, e adequada densidade de cobertura superficial. Nessa situação, os solos ficam expostos à intensa radiação solar, à erosão eólica e à erosão causada pelas chuvas intensas, comuns no início da estação chuvosa (LAL et al., 1989).

Mas não é só isso que ocorre em grande parte das áreas agrícolas do Cerrado. A falta de rotação de culturas, sustentada preferencialmente pela sucessão soja –milho safrinha não é capaz de manter o teor de matéria orgânica no sistema. Ainda que o milho safrinha possa ser justificado pelo acréscimo de renda, o cultivo produz apenas 5,0 ton/ha de massa seca na mesma safra (BAYER et al, 1997; SÁ et al.,2006).

Essa condição é agravada em regiões tropicais, como o Cerrado, uma vez que a taxa de decomposição da matéria orgânica é muito maior do que em regiões subtropicais. Em consequência da redução do conteúdo de matéria orgânica, o solo perde sua qualidade não só física, mas também química e biológica (PEDROTTI & MELLO, 2009).

Reverter a situação de pouca adição da (MOS) constitui o primeiro passo para que o sistema de plantio direto resulte em maior qualidade.

Dentro disso, trabalhos da Fundação MT em Sinop/MT demonstram ser possível a recuperação da matéria orgânica em curto período de tempo através de elevado aporte de resíduos culturais (SEGUY et al., 2001).

Entre as diversas plantas de cobertura que vêm sendo utilizadas no Cerrado, o milheto, sorgo e a braquiária, tem se destacado como boas produtoras de palha (RESCK et al, 2000).

Além dos benefícios relatados, as plantas de cobertura, tais como o milheto, nabo forrageiro e a crotalária podem desempenhar importante papel na reciclagem de K, pela absorção desse nutriente das camadas mais profundas do solo, e a sua deposição, através dos resíduos, na superfície (ROSSATO, 2004).

Esse aspecto é particularmente importante, pois nos solos arenosos do Cerrado, ($<200 \text{ g.dm}^{-3}$ de argila), com baixa CTC, as perdas de K por lixiviação são significativas nessas condições (COSTA et al., 1996).

Em tal sentido, Calegari et al (2007) acresce que as plantas de cobertura devidamente empregadas na seqüência de culturas tendem a contribuir para uma melhoria do sistema de produção, com reflexos diretos na capacidade produtiva do solo e na produtividade de grãos favorável dos cultivos posteriores.

2.6 A calagem no plantio direto

A acidez do solo pode se constituir em fator de limitação da produtividade dos cultivos, notadamente quando o pH baixo estiver associado

com saturação de Alumínio acima de 10% e Manganês tóxico, como ocorre em grande parte dos Cerrados (COCHRANE; AZEVEDO, 1988).

O alumínio estará presente na solução do solo, disponível para ser absorvido pelas raízes quando o pH do solo for inferior a 5,5. O principal efeito do alumínio é a diminuição da expansão da parede celular das raízes, sintoma visualizado com menor crescimento, resultando em limitada capacidade de absorção de água e nutrientes. O alumínio também é fonte de acidez do solo (COSTA et al, 1996).

Isso exige a correção da acidez do solo e do subsolo como fundamento das boas práticas de manejo para superar as limitações de produtividade impostas por essa condição (PROCHNOW, 2014).

O aumento da produtividade agrícola com aplicação de calcário em solos ácidos, têm sido relatados em diferentes cultivos e locais. Alley (1996) trabalhando com milho nos EUA, obteve aumento de 500% na produtividade da cultura com adição de calcário. Oliveira e Pavan (1997), obtiveram aumentos de 42% na soja (Brasil) com aplicação de calcário em superfície no plantio direto.

Souza e Lobatto (2004) recomendam que no Cerrado, a calagem deve ser realizada para elevar a V% a 50% e o Mg^{2+} de 0,5 a 1,0 $cmol_c\ dm^{-3}$ em amostragem de solo de 0 a 20 cm. Os mesmos autores mencionam que a produtividade máxima de soja foi obtida com a saturação de bases de 50 a 60%. A partir desses valores, houve decréscimo de produtividade da cultura. Similar recomendação foi feita por Korndörfer H. G. (1999), que demonstra que a produtividade da soja aumenta com o V até 40%, estabilizando entre 40 e 60%, apresentando decréscimo com V acima de 60%.

Com referência a esses resultados, Garcia et al (1996) relatam que o aumento excessivo da saturação de bases tem efeito direto não só na diminuição da resistência das plantas, pela deficiência acentuada de micronutrientes, mas também no aumento da população de Nematóides de Cistos da Soja (NCS). Esse resultado também é relatado por Asmuz et al (1999) em áreas do MS.

Em relação ao nematoides de lesões radiculares, Debiasi et al (2013) mostra em trabalho no MT que reboleiras com essa espécie em soja ocorrem em manchas de solo com pH baixo; m% alto; $\text{Ca}^{2+} > 2,0 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} < 0,8 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e $\text{V}\% < 50\%$ na camada de 0 a 0,10 m.

Apesar de que esses desequilíbrios não estejam relacionados diretamente a correção de acidez do solo, a exigência ambiental por um modelo de agricultura conservacionista tem imposto a manutenção do solo coberto por palha. Em consequência disso, a complexação do alumínio por ácidos orgânicos resultantes da decomposição da matéria orgânica contribui para menor acidificação do solo, resultando em menor quantidade de calcário a ser aplicada (THOMAS; COSTA, 2010).

Caires et al. (2000) demonstram a baixa resposta dos cultivos à calagem no PD, desde que a saturação de bases esteja na faixa de 45 a 50%, os teores de Ca, Mg, K sejam adequados e o teor alumínio seja baixo na camada de 0 a 0,20 m.

Nesse aspecto, o critério de nível de suficiência adequado de cátions trocáveis tem sido preferencialmente usado em relação a questão polêmica que busca uma relação ideal de Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo. A maior parte das pesquisas tem demonstrado que a relação Ca/Mg presentes nos solos não tem influência sobre os rendimentos dos cultivos, desde que os teores desses nutrientes estejam acima dos níveis críticos (EMBRAPA, 1991; RICHLEY & SOUZA, 1980; SERAFINI, 1991; OLIVEIRA, 1993; QUAGGIO, 2001).

No entanto, diversos autores citam que o excesso de cálcio e magnésio em camadas superficiais do solo podem causar prejuízos à produtividade (CAIRES et al., 2005).

Em reforço a essas interações, estudos conduzidos em solos argilosos do RS com alto teor de K, mostram que elevados teores deste nutriente pode diminuir a absorção de Cálcio e Magnésio devido ao desequilíbrio na relação de cátions no solo. Tal condição é comum nas áreas de plantio direto com rotação de culturas (COSTA & THOMAS, 2010).

Além dessas interações, para se chegar ao quantitativo adequado de calagem pelo método de saturação de bases, a metodologia usual de laboratório realizada com KCL N tem sido preferida, em razão da análise por resina de troca catiônica superestimar os valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas análises de solo (RAIJ, 1999).

A respeito dessa comparação de metodologias, Soratto & Crusciol (2008) estudando amostras de solo 18 meses após a calagem, obtiveram por resina trocadora diferenças a maior de 65% para Ca^{2+} e 27% para Mg^{2+} , quando comparadas ao método usual de percolação com solução HCL. Esses resultados podem ser comprovados nos trabalhos de Caires et al. (2008), que verificaram diferenças em análises de resina na ordem de 200% a maior para Ca^{2+} e 250% para o Mg^{2+} , 36 meses após a calagem em superfície no plantio direto.

Ao contrário de Ca^{2+} e Mg^{2+} , o enxofre (S) apresenta um comportamento peculiar, combinando-se com cátions básicos e favorecendo a translocação desses no perfil do solo (GONZALES-ÉRICO et al., 1979; SUMMER et al., 1986; FARINA & CHANNON, 1988). Isso constitui uma estratégia eficiente, particularmente, para corrigir a acidez em subsuperfície, auxiliando, as aplicações superficiais de calcário em plantio direto.

Essas aplicações quando excessivas, podem causar desequilíbrios biológicos e nutricionais à produção vegetal. Tais efeitos são agravados porque a correção da acidez do solo vem sendo realizada sem amostragem estratificada e, em taxas fixas, desconsiderando a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade de solo, na maior parte das áreas de plantio direto.

2.7 A geoestatística como ciência de suporte à agricultura de precisão

O ponto de partida no processo do conhecimento da variabilidade espacial de um atributo é a amostra, a partir da qual podemos conhecer o fenômeno em estudo (LANDIM & YAMAMOTO, 2011).

Até então, esse conhecimento de experimentação agrícola estava fundamentado na estatística clássica. Mas segundo Hamlett et al. (2006), as

análises estatísticas “tradicionais” baseadas na independência das observações, têm sido substituídas por análises espaciais, as quais consideram as correlações entre observações vizinhas. Isso deu lugar a geoestatística.

A geoestatística pode ser empregada no caso de amostragens com distâncias conhecidas, determinando-se a variabilidade espacial do atributo por semivariogramas que definem o grau de dependência no espaço de cada amostragem realizada (Reichardt et al., 1986). Assim, é possível determinar espaçamentos entre pontos de amostragem para os quais as médias de um atributo do solo sejam realmente independentes entre si.

Na agricultura, a quantidade de amostras que atende a geoestatística, torna-se inviável para a agricultura de precisão. Na prática, o que tem sido utilizado são malhas de amostragem que atendem os custos econômicos, mas são deficientes para efetuar recomendações diferenciadas dentro dos talhões de estudo (COELHO, A.M., 2008).

Mas malhas adequadas por si só não asseguram uniformidade de recomendação nos mapas interpolados por krigagem. Resende et al (2006) trabalhando com densidades amostrais de 0,25; 1; 2,25 e 4 ha, obteve resultados muito distintos em relação a níveis de K no solo, que certamente acarretariam recomendações de corretivos muito diferentes dentro do mesmo talhão.

O ponto chave nessas questões, deve ser o monitoramento das áreas de agricultura de precisão ao longo do tempo, utilizando-se não só amostragens de solo regulares, mas outras ferramentas que possam auxiliar o entendimento das causas de variabilidade da produtividade dos cultivos (COELHO et al., 2007).

2.7.1 O Semivariograma simples

Interpolação é o procedimento pelo qual se estimam valores de uma variável em área interior aos pontos de amostragem, permitindo representa

em mapa, de forma contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente (ANDRIOTTI, J. S., 2010).

A geoestatística pode ser empregada no caso de amostragens com distâncias conhecidas, determinando-se a variabilidade espacial do atributo por semivariogramas que definem o grau de dependência no espaço de cada amostragem realizada (Reichardt et al., 1986). O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço ou no tempo (EMBRAPA, 2004). Essa representação é definida por três parâmetros: o efeito pepita (C_0), o patamar ($C_0 + C$) e o alcance (A_0). A fórmula do semivariograma é a seguinte:

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

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pelo vetor h , e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura.

O efeito pepita (C_0) é representado por um valor da semivariância, diferente de zero, quando a distância entre pontos amostrais é nula. O efeito pepita puro significa a ausência total de correlação entre os pontos amostrados.

Sendo o semivariograma uma função crescente do vetor (h), tem-se que, a medida que o módulo do vetor aumenta, a variação entre os pares de amostras tende a aumentar, até uma distância a partir da qual tal fato não ocorre. Essa distância é o alcance (A_0). Nesse ponto se define o estado de dependência ou independência das amostras. O patamar ($C_0 + C$) é o valor de $\gamma(h)$ correspondente ao alcance e coincide com a variância a priori do conjunto de dados estudado.

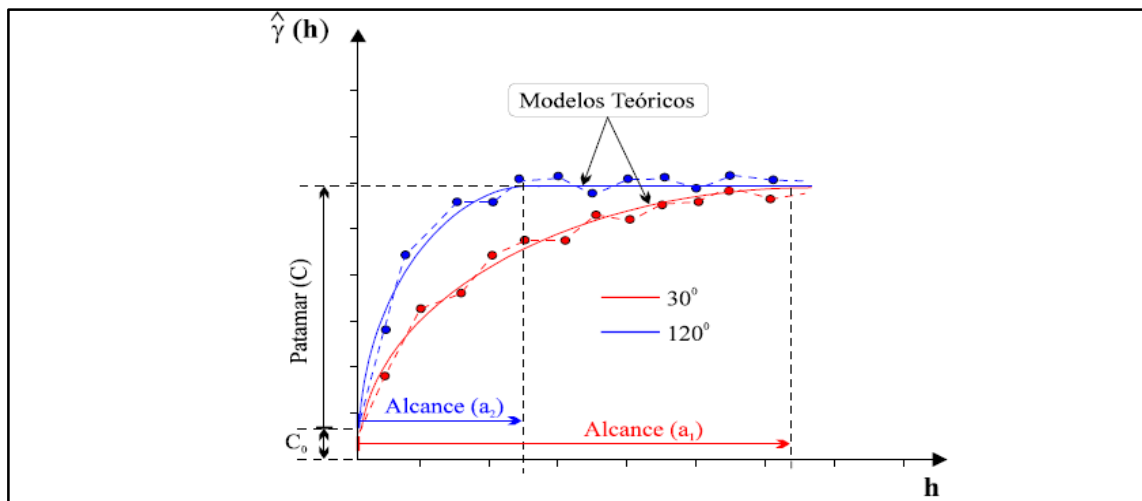
Definido o patamar, obtém-se o alcance. O conhecimento do alcance é de extrema importância na geração dos mapas de krigagem, uma vez que o alcance fornece a dimensão do grid de amostragem. O tamanho do grid é

importante para que a variabilidade não seja sub ou super-estimada (CHANG et al., 1999).

Ainda que esse aspecto seja relevante, a maior parte dos programas que geram mapas em agricultura de precisão, já trazem semivariogramas prontos, sem possibilidade de ser editados. Isso representa baixa qualidade dos estudos semivariográficos.

A Figura (1) apresenta o comportamento típico de semivariogramas em diferentes direções com os respectivos alcances (m)

Figura 1 - Exemplo de semivariograma teórico



(LabGis, 2014)

2.7.2 A krigagem ordinária

A geoestatística utiliza os dados duas vezes, primeiramente para estimar a autocorrelação espacial e depois para estimar. Para tanto, a técnica se baseia em estimadores. Um deles é a krigagem que fornece valores precisos sobre áreas ou pontos a ser avaliados e a margem de erro que está associada a estimativa.

O estimador que permite estimar valores (z^*) para qualquer local (x_0), onde não se tem valores medidos é:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N(h)} (\lambda_i) Z(x_i) \dots \dots \dots (2)$$

em que: N é o número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$.

Os resultados do estudo podem ser expressos em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. Porém, a maneira mais utilizada para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (CORÁ; BERALDO, 2006).

A precisão dos mapas depende de fatores como a intensidade, esquema da amostragem e da escolha do método de interpolação dos dados. Dentro desses critérios, a malha amostral tem maior peso na qualidade dos mapas de krigagem.

2.7.3 Dependência espacial de atributos de solo e da planta

Quando se analisa a variabilidade espacial de atributos do solo e da planta, a maior parte dos ajustes de semivariogramas tem sido representado por modelos esféricos (SILVA et al., 2003).

Dentro desses modelos, estudos realizados por Nogueira et al. (2011), comprovaram correlações de dependência espacial do pH de solo e da saturação em áreas de maior fertilidade do solo com a produtividade de grãos. Tal efeito não foi observado nas propriedades físicas do solo.

Em relação a dependência espacial dos sistemas de produção, alguns trabalhos indicam que sistemas de preparo convencional e pastagem apresentam menores alcances quando comparados à condição de Cerrado e ao plantio direto (CAVALCANTE et al., 2007).

Nesses sistemas, a dependência espacial é alta no caso de propriedades do solo estáveis, como a textura e mineralogia do solo. Mas a continuidade espacial é baixa em atributos como o P, por exemplo (RESENDE et al, 2002; COELHO & MACHADO et al, 2004). Corá et al. (2004) obtiveram alcance no caso de P de 77,5 m. Isso exige uma amostragem mais densa.

Por essa razão, não existe uma malha de amostragem ideal. Nem se pode exportar grides de amostragem para outras áreas, porque a variabilidade espacial muda conforme a área e a cada nova prática agrícola na mesma área.

2.7.4 Semivariogramas cruzados e cokrigagem

Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser realizada usando-se informações de uma segunda variável expressas no semivariograma cruzado. Este método é chamado de cokrigagem. A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse a partir de informações que se tem sobre ela própria e também das informações disponíveis que tenha correlação espacial com ela (ANDRIOTTI, 2010).

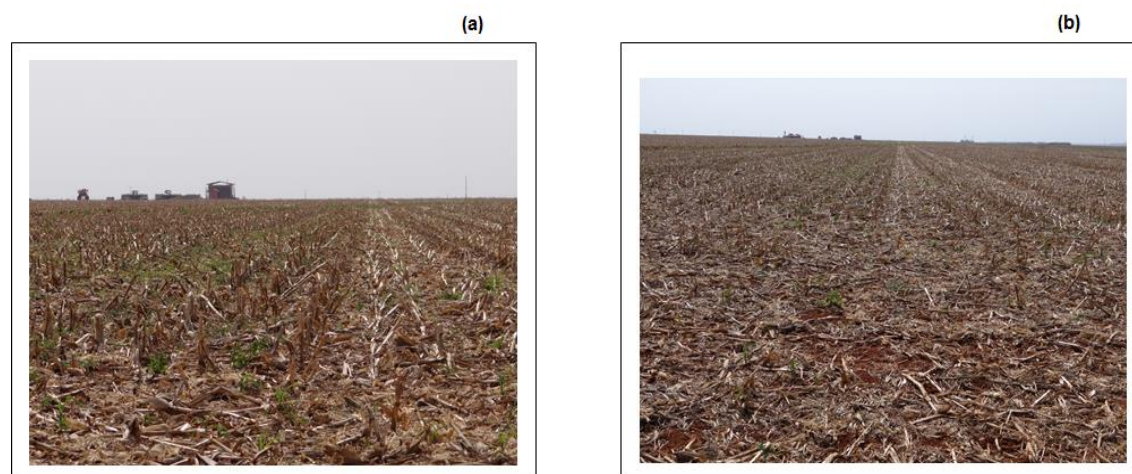
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado em uma área de 52 ha, delimitada pelas coordenadas geográficas de Long -53,268393 e Lat -18,13584 (WGS 84), como parte do talhão (T1) da Fazenda Santa Nice, município de Costa Rica/MS.

A referida área vem sendo cultivada em regime de plantio direto com soja e milho safrinha. Na implantação deste trabalho, foi realizada uma gradagem leve, mantendo os restos culturais da palhada de milho safrinha na superfície do solo para posterior semeadura da soja. A caracterização desta condição de manejo pode ser vista na Figura (2) a seguir.

Figura 2. Caracterização do cultivo na área de estudo

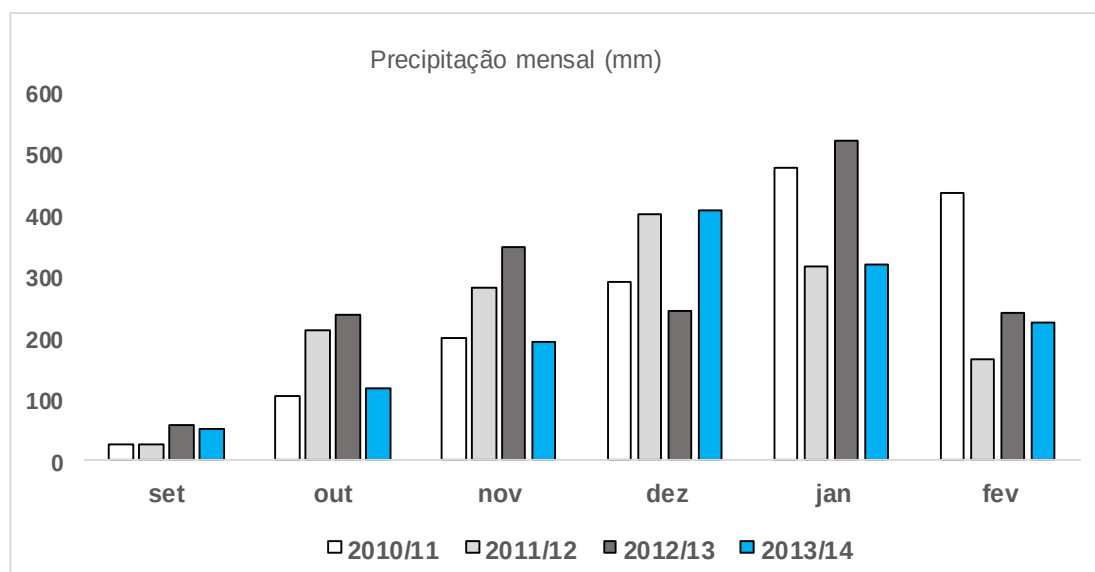


Fonte: imagem e elaboração do autor; (a) palhada de milho safrinha após colheita; (b) palhada de milho após grade superficial

O clima na região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo AW-tropical chuvoso, com temperaturas anuais oscilando entre 18° a 32°C, e precipitação anual entre 1.000 a 1.700 mm por ano, com duas estações bem definidas: seca, no inverno; e úmida, no verão. Mais de 70% das precipitações está concentrada de setembro a março.

O comparativo com os três anos anteriores ao estudo pode ser conferido na Figura (3).

Figura 3. Precipitação mensal (mm) de setembro a fevereiro nas safras agrícolas de 2010/11 a 2013/14 na área de estudo

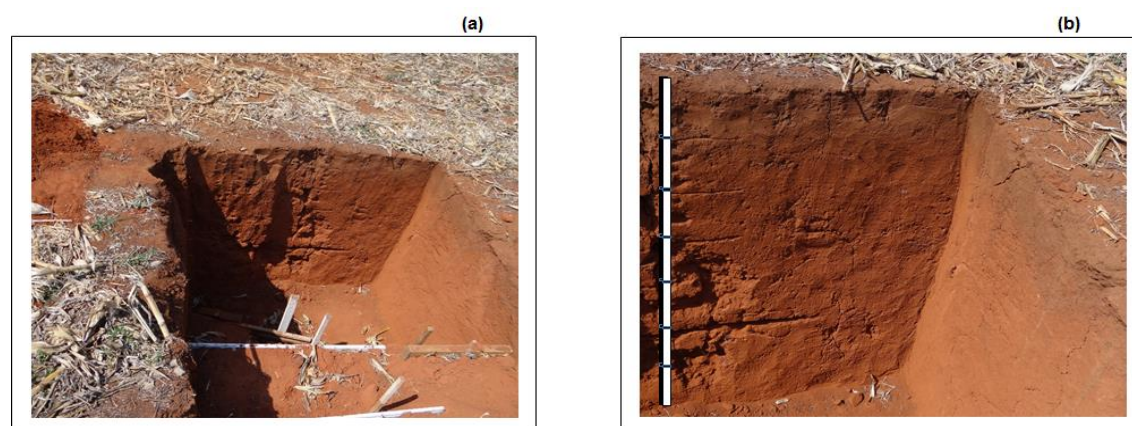


Fonte: Fazenda Rancho do Planalto, Costa Rica/MS; colheita do milho safrinha: junho/2013; semeadura da soja: outubro/2013; Colheita da soja: janeiro/2014

3.2 Classificação do solo na área de estudo

O estudo foi conduzido em um solo classificado como Latossolo Bruno Distrófico, Textura muito argilosa, A moderado, epidistrófico, Tmb, muito profundo. As análises químicas indicaram uma relação textural de 1,27 com elevados teores de argila. O relevo da área é plano, com 850 m de altitude. A caracterização inicial do solo na área de estudo está representada na Figura (4) abaixo.

Figura 4. Caracterização inicial do solo na área de estudo



Fonte: imagem e arte do autor; (a): trincheira de campo; (b) estudo do perfil do solo

Para efetuar a classificação do solo, avaliar a fração mineralógica e o estado da fertilidade química, foram coletadas amostras deformadas com trado de caneca, tomadas em intervalos regulares de 0,20 m desde a superfície do solo até 1,40 m de profundidade. Os resultados das análises físicas foram conferidos no perfil de trincheira com a carta de Munsell, que classifica a cor do solo pela matiz, valor e croma. As análises dos atributos físicos do solo estão apresentadas na Tabela (1).

Tabela 1. Análise granulométrica do perfil de tradagem do Latossolo Bruno Distrófico da área de estudo

Prof. (m)	Cor		Argila (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Areia (g.kg ⁻¹)
	(seco)	(úmido)			
0,00-0,20	5.0YR 4/4	5.0YR 3/3	542	321	137
0,20-0,40	5.0YR 4/4	5.0YR 3/3	671	226	103
0,40-0,60	7.5YR 5/6	7.5YR 4/4	758	148	94
0,60-0,80	7.5YR 6/6	7.5YR 4/4	743	162	95
0,80-1,00	7.5YR 6/6	7.5YR 4/6	756	147	97
1,00-1,20	7.5YR 8/6	7.5YR 5/6	782	124	94
1,20-1,40	7.5YR 8/6	7.5YR 5/6	762	142	96

Em sequência a composição granulométrica do solo, foram realizadas análises químicas do perfil de tradagem, conforme consta na Tabela (2).

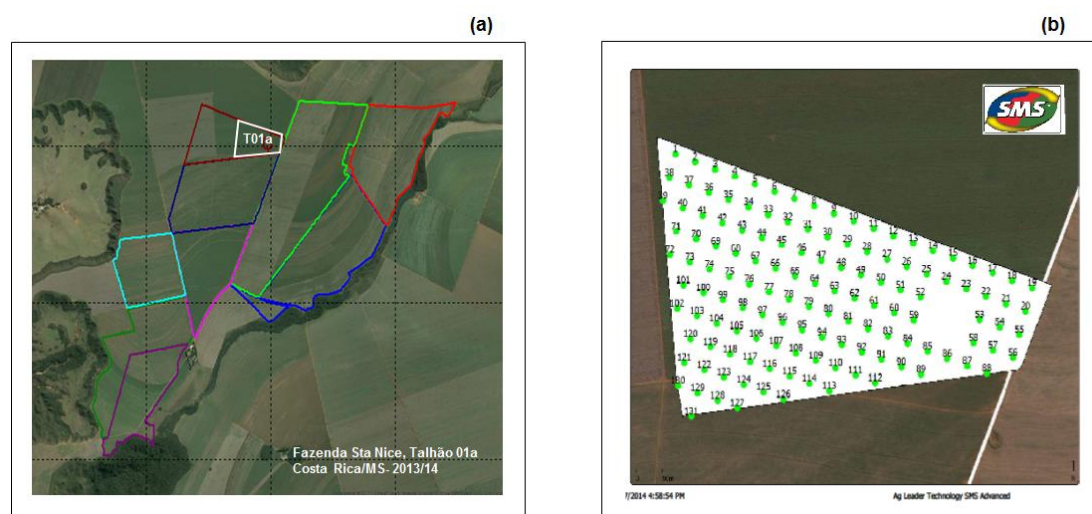
Tabela 2. Atributos químicos do perfil de tradagem na área de estudo

Prof. (m)	pH (CaCl ₂)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ΔpH	P (mg dm ⁻³)	MO	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al ³⁺	Al ³⁺	SB	T	S-SO ₄ (mg dm ⁻³)	V (%)	m (%)
0,00-0,20	5,0	5,7	4,8	-0,9	67,0	35,0	0,2	3,0	0,8	4,7	0,1	4,0	8,7	7,0	46,0	2,4
0,20-0,40	4,7	5,5	4,6	-0,9	1,0	23,0	0,1	1,1	0,3	4,0	0,2	1,5	5,5	34,0	26,9	12,0
0,40-0,60	4,8	5,5	4,8	-0,7	1,0	17,0	0,0	0,8	0,3	3,1	0,1	1,1	4,2	67,0	26,5	8,2
0,60-0,80	5,2	5,8	5,2	-0,6	1,0	14,0	0,0	0,6	0,3	2,4	0,0	0,9	3,3	51,0	27,7	0,0
0,80-1,00	5,4	6,1	5,4	-0,7	1,0	13,0	0,0	0,6	0,3	2,2	0,0	0,9	3,1	41,0	29,5	0,0
1,00-1,20	5,6	5,9	5,8	-0,1	1,0	12,0	0,0	0,4	0,3	1,9	0,0	0,7	2,6	6,0	27,2	0,0
1,20-1,40	5,6	5,6	5,9	0,3	1,0	11,0	0,0	0,3	0,2	1,8	0,0	0,5	2,3	3,0	22,1	0,0

3.3. Implantação da malha de amostragem

Para avaliar os atributos do estudo, foi instalada uma malha amostral quadricular de 131 pontos georreferenciados, com equivalência de 1 ponto a cada 0,40 ha. O total de pontos foi definido a partir de trabalhos similares para obtenção da dependência espacial geoestatística. As amostragens de solo foram tomadas por uma camionete equipada com trado eletro-mecânico, broca de 7/8 pol, com coletas de 0 a 0,20 m de profundidade. As amostras compostas foram obtidas por um conjunto de 12 amostras simples, coletadas em um raio de 10 m a partir de um ponto central da grade amostral. A amostragem de solo representada na Figura (5) abaixo foi realizada após a colheita do milho safrinha.

Figura 5. Implantação da malha de amostragem



Fonte: Imagem de satélite do Google e elaboração do autor; (a) localização da área de estudo (T01a); (b) grade amostral no programa SMS

3.4. Condução técnica da cultura da soja na área de estudo

Dada a alta fertilidade de solo na área de estudo, foi escolhida a cultivar de soja NA 5909, ciclo precoce, com semeadura direta em meados de outubro de 2013/14, sob palhada de milho safrinha. Avaliações de campo indicaram uma população final de aproximadamente 340 mil plantas.ha⁻¹. A colheita da soja na área de estudo foi iniciada em janeiro de 2014.

Em relação a adubação, o alto estoque de K disponível no solo (0,32 cmol_c.dm⁻³), permitiu a escolha de uma formulação sem potássio, para

diminuir o efeito salino do fertilizante no sulco de semeadura. Por essa razão, a dose de 180 kg.ha^{-1} da formulação (05-37-00) aplicada no plantio, equivalente a $9,0 \text{ kg.ha}^{-1}$ de N e 67 kg.ha^{-1} de P_2O_5 , atendeu a adubação de manutenção da cultura. A exigência de N foi suprida através da inoculação com rizóbio específico. Além dessa prática, acrescentou-se 3 g.ha^{-1} de Co e 12 g.ha^{-1} de Mo no tratamento de sementes.

Para suprir a quantidade anual de S pela cultura da soja, utilizou-se 300 Kg.ha^{-1} de Gesso aplicado em taxa fixa com dois meses antecedentes a semeadura da soja.

A calagem em taxa variável foi calculada para uma saturação de bases de 50%, segundo recomendação de Souza et al (2004). Nesta condição, como os valores médios de (V%) das análises químicas estavam próximos ao limite de 50%, a recomendação de calagem com os dados iniciais originou um conjunto com excesso de "zeros" (dose=0; $V > 50\%$) e poucos valores altos. Diante dessa condição, o conjunto de dados apresentou forte assimetria e uma distribuição não normal. Isso exigiu a transformação dos dados.

Nesse processo de transformação dos dados originais incluiu-se, preliminarmente, valores negativos de recomendação de calagem com ($V > 50\%$). Em uma segunda etapa, esses valores negativos foram excluídos após a krigagem. Tal procedimento teve como objetivo preservar o conjunto de dados originais e a mudança da forma de distribuição de frequências (KOCH; LINK, 1971).

3.5 Metodologias de determinação dos atributos pesquisados

3.5.1 Análises químicas

As determinações dos atributos pesquisados seguiram o manual da Embrapa (1997). Os atributos químicos avaliados foram: pH em CaCl_2 (relação 1:1), índice SMP, teores de P e K extraídos por Mehlich1 (relação 1:10), Al, Ca e Mg trocáveis, extraídos por KCl mol L^{-1} . A partir desses dados, foi calculada a soma de bases, a CTC efetiva, a CTC em pH 7,0, a saturação por bases (V) e de Al (m), e as relações Ca:Mg, K:Mg e K:Ca. O conteúdo de

C orgânico foi determinado pelo método de combustão úmida, descrito por Nelson & Sommers (1986) e expresso em matéria orgânica do solo (MO).

3.5.2 Análises físicas

Além dos atributos químicos estudados, foram realizadas análises físicas do solo no laboratório da UFMS, Câmpus de Chapadão do Sul/MS.

A resistência do solo à penetração foi avaliada na condição de umidade do solo próxima à capacidade de campo, com penetrômetro digital e cinco repetições por ponto, no mesmo raio e profundidade (0 a 0,20 m) de coleta das amostras químicas de solo. A densidade do solo (DS) foi determinada em amostras com estrutura indeformada, coletadas com amostrador de Uhland e a densidade das partículas pelo método do balão volumétrico.

Para determinar a porosidade total do solo, as amostras indeformadas foram saturadas durante 24 h em bandeja com água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram colocadas em uma mesa de tensão e submetidas ao potencial equivalente a 0,60 m de coluna d'água até cessar a drenagem. Nas mesmas amostras foi determinada a umidade gravimétrica do solo (EMBRAPA, 1997). A umidade volumétrica do solo foi obtida pelo cálculo indireto, referendado por Kiehl (1979).

$$U_v = U_g \times D_s \dots\dots\dots(3)$$

Onde, U_v é a umidade volumétrica ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$); U_g é a umidade gravimétrica ($\text{m}^3.\text{m}^3$) e D_s é a densidade do solo ($\text{kg}.\text{dm}^{-3}$)

3.5.3. Análise dos dados de produtividade de grãos

Os dados de produtividade de soja na área de estudo foram obtidos em uma colhedora equipada com monitor integrado por sensores de rendimento, umidade de grãos, unidade de armazenamento temporário e antena com sinal de GPS.

Os dados brutos da colheita foram submetidos a uma filtragem, utilizando-se uma planilha do Excel, a fim de identificar e eliminar eventuais erros ou outliers, conforme proposto por Menegatti, (2002). Dentre estes

erros, inclui-se registro dos dados com coordenadas fora da área colhida (erro de posicionamento), produtividade nula ou ausente e pontos de rendimento com valores excessivamente elevados ou baixos (BLACKMORE & MARSHAL; MENEGATTI, 2002). A metodologia de Menegatti (2002) está baseada nas equações (4) e (5) de Tukey (1997), com definição dos limites para exclusão de outliers.

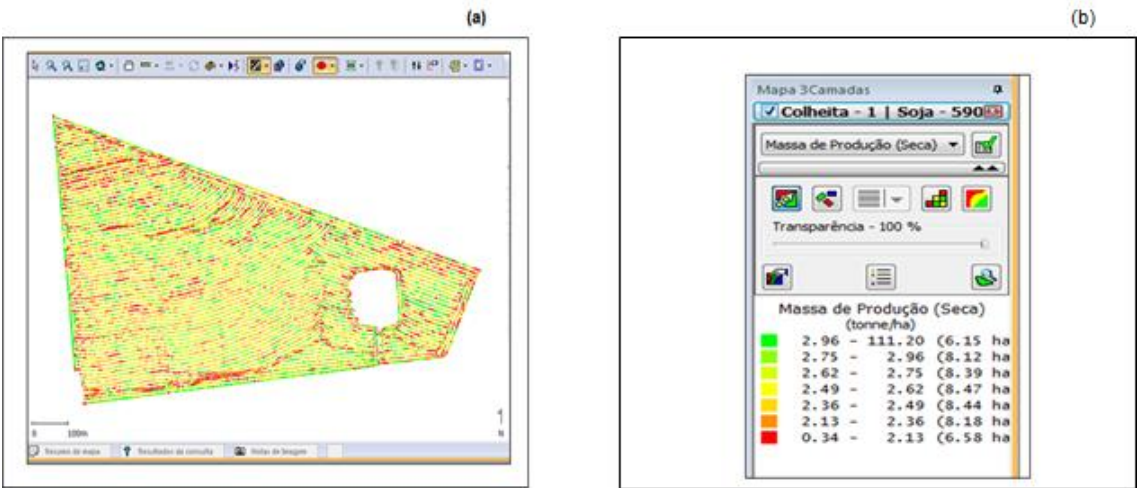
$$LS=QS+ 1,5 IA.....(4)$$

$$LI=QI - 1,5 IA.....(5)$$

onde LS= Limite Superior; LI = Limite Inferior; Q3= 3º Quartil; Q1= 1º Quartil e IA é o Intervalo interquartilico.

A filtragem dos dados foi aplicada sobre um total de 26.736 pontos de produtividade obtidos na área do estudo. Após a exclusão dos valores discrepantes, esse total foi correlacionado com a malha de amostragem do solo, através das médias de produtividades em um raio de 10 m ao redor dos pontos georreferenciados da mesma grade. O mapa dos dados brutos da produtividade de soja pode ser visto na Figura (6).

Figura 6. Mapa com dados brutos da produtividade de soja na área de estudo



(a) Mapa da produtividade de grãos; (b) classes de produtividade (ton.ha⁻¹) registradas no programa SMS

3.6. Análise estatística dos dados pesquisados

3.6.1 Análise estatística descritiva

Os resultados dos atributos pesquisados foram submetidos à estatística descrita e ao teste de normalidade da distribuição de frequências de Shapiro-Wilk a 5%. Tal procedimento foi realizado para verificação de outliers. O critério de exclusão dos valores discrepantes foi estabelecido a partir de três (3) desvios padrão positivos ou negativos a contar da média ($\bar{x}+3s$; $\bar{x}-3s$). Dessa forma, excluiu-se valores dos atributos que estavam fora de 99,72% dos intervalos anteriores definidos da distribuição normal. Observada sua ocorrência, os valores foram substituídos pela média dos pontos circunvizinhos da malha de amostragem.

3.6.2 Análise linear de Regressão

Para identificar as relações de causa-efeito dos fatores condicionantes à produtividade, utilizou-se a matriz de correlação de Pearson, com teste F a 5% de significância. A análise de correlação foi efetuada em combinações pareadas, dois a dois atributos, relacionando cada atributo à produtividade de grãos.

A análise semivariográfica dos que obtiveram significância estatística e maior correlação linear com a produtividade de grãos, teve como finalidade a possibilidade destes virem a formar semivariograma cruzado e cokrigagem.

3.7 Análise geoestatística

A verificação da qualidade de ajuste dos semivariogramas aos dados experimentais foi realizada pelos critérios pré-definidos no programa GS+ (2004). Essa avaliação de ajustes dos semivariogramas (simples e cruzados), em função de seus modelos, foi estabelecida pela seleção inicial de: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); b) o maior coeficiente de determinação espacial (r^2) e c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE).

O avaliador de dependência espacial é determinado, como sendo a relação percentual entre a variância estrutural (C) e o patamar, ou seja, $C/(C+C_0)$. Quanto maior este índice, menor a aleatoriedade espacial. Segundo Robertson (1998) considera-se: a) fraca dependência espacial, para o $ADE \leq 25\%$; b) média dependência espacial, para $25\% < ADE \leq 75\%$, e c) forte dependência, para $ADE > 75\%$.

A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor rede de krigagem ou cokrigagem.

A representação gráfica do ponto de vista geoestatístico dos atributos pesquisados foi realizada somente aos que apresentaram importância ao trabalho, expressa pela significância estatística e os que melhor explicam a variabilidade da produtividade de grãos na área do estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise estatística descritiva dos dados

4.2 Atributos químicos do solo

A análise estatística dos atributos químicos pode ser vista na Tabela (3) abaixo.

Tabela 3. Estatística descritiva de atributos químicos na área de estudo na profundidade de 0 a 0,20 m

Atributos	un	Média	Valores		Desv pad	CV (%)	Coeficientes		p<0.05	TD
			Mínimo	Máximo			Assim	Curtose		
pH		5,02	4,80	5,30	0,11	2,21	-0,04	-0,57	0,00	NNO
MO	(g.dm ⁻³)	44,16	34,90	56,50	4,35	9,84	0,19	-0,03	0,27	NO
P	(mg.dm ⁻³)	10,75	5,60	18,20	2,53	23,56	0,64	0,38	0,03	NNO
S	(mg.dm ⁻³)	2,37	0,50	4,90	1,00	42,13	0,21	-0,45	0,08	NO
Ca	(cmol _c .dm ⁻³)	3,89	2,50	5,10	0,54	13,77	-0,05	-0,54	0,39	NO
Mg	(cmol _c .dm ⁻³)	0,88	0,50	1,20	0,14	16,15	-0,06	-0,45	0,00	NNO
K	(cmol _c .dm ⁻³)	0,32	0,20	0,48	0,06	19,57	0,60	-0,16	0,00	NNO
Al	(cmol _c .dm ⁻³)	0,05	0,00	0,09	0,02	30,95	0,29	0,32	0,20	NO
H+Al	(cmol _c .dm ⁻³)	5,31	3,80	6,50	0,57	10,81	0,01	-0,33	0,20	NO
SB	(cmol _c .dm ⁻³)	5,09	3,64	6,40	0,61	11,90	-0,15	-0,55	0,45	NO
T	(cmol _c .dm ⁻³)	10,42	8,56	12,17	0,74	7,07	0,03	-0,10	0,71	NO
V	%	48,96	35,90	58,37	4,61	9,42	-0,13	-0,33	0,47	NO
m	%	1,02	0,00	2,33	0,43	42,00	0,72	0,10	0,00	NNO
Ca/Mg		4,43	3,00	6,29	0,62	14,05	0,63	0,56	0,00	NNO
Ca/K		12,62	4,63	21,90	3,29	26,08	0,16	-0,06	0,81	NO
Mg/K		2,83	0,86	5,00	0,74	26,03	0,27	0,18	0,52	NO
NC	(kg.ha ⁻¹)	322	0	1647	366,79	113,77	1,00	0,33	0,00	NNO

pH (CaCl₂); MO: Matéria orgânica; P: Fósforo; S: Enxofre; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; Al Alumínio; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de Bases; T: CTC; V: Saturação de bases; m: Saturação de alumínio; Ca/Mg, Ca/K, Mg/K: Relações catiônicas; NC: Necessidade de calcário; Teste de Normalidade (p<0,05) por Shapiro-Wilk a 5%; TD: Tipo de distribuição; NC¹: média de dados não transformados; amostragem de 0 a 0,20 m.

4.2.1 Valores médios dos atributos químicos

Os resultados dos atributos da Tabela (3) mostram que a área de estudo apresenta de uma forma geral, alta fertilidade do solo, traduzida por níveis adequados de P (8,1 a 12 mg dm⁻³), alto estoque de K (0,32 cmol_c

dm⁻³), elevado teor de cálcio (3,89 cmol_c dm³), e saturação por alumínio praticamente inexistente (1,02 %). A saturação de bases (V) média próxima a 50 indica a não necessidade de calagem na maior parte da área. A interpretação desses resultados foi realizada conforme o boletim técnico da Fundação MT (2013).

4.2.2 Variabilidade dos atributos químicos

Em relação aos coeficientes de variação, os atributos químicos analisados expressam diferentes graus de variabilidade. O grupo formado pelo pH (CaCl₂), MO, AP, SB, T, AP e V, apresentou CV abaixo de 12%. Em relação aos demais atributos, as análises mostram CV médios para o Ca (13,77%), Mg (16,15%), K (19,57%), fósforo (23,56%), Al (30,95%) e enxofre (42,13%). O CV é alto para a necessidade de calagem (113,75%). Essa classificação está em conformidade com Warrick & Nielsen (1980), que estabelecem três faixas definidas: Baixa: CV ≤ 12%; Média: 12% ≤ CV ≤ 52%; Alta: >52%.

No caso do fósforo, os altos valores de CV obtidos nas análises efetuadas decorrem das quantidades aplicadas e da forma de aplicação do nutriente no solo, em linha no sulco do plantio ou a lanço em taxa variável. Em consequência disso, atributos com CV altos, acentuam o caráter antrópico da variabilidade do solo sobre a produtividade dos cultivos (SILVA et al., 2003).

A observação de CV mais elevados de enxofre e calagem é justificada por Raij (1991), que afirma que propriedades relacionadas à fertilidade do solo apresentam CV mais altos, por causa da variação das adubações. Acrescenta ainda o autor, que algumas variáveis se tornam dependentes de outras, como é o caso do Ca²⁺, que é fornecido através da calagem, que nem sempre está correlacionada a critérios corretos de recomendação e amostragem.

A questão de calagens inadequadas pode ser exemplificada pelas dimensões usuais das grades amostrais na maioria das áreas de agricultura de precisão, caracterizadas por baixa densidade amostral em função dos

custos elevados de uma amostragem mais densa, onde não se representa de forma adequada a variabilidade da fertilidade do solo. Além disso, existe a desuniformidade nas aplicações. Na situação particular deste estudo, as doses de calcário variaram de 0 a 1647 kg.ha⁻¹.

4.2.3 Distribuição de Frequências dos atributos químicos

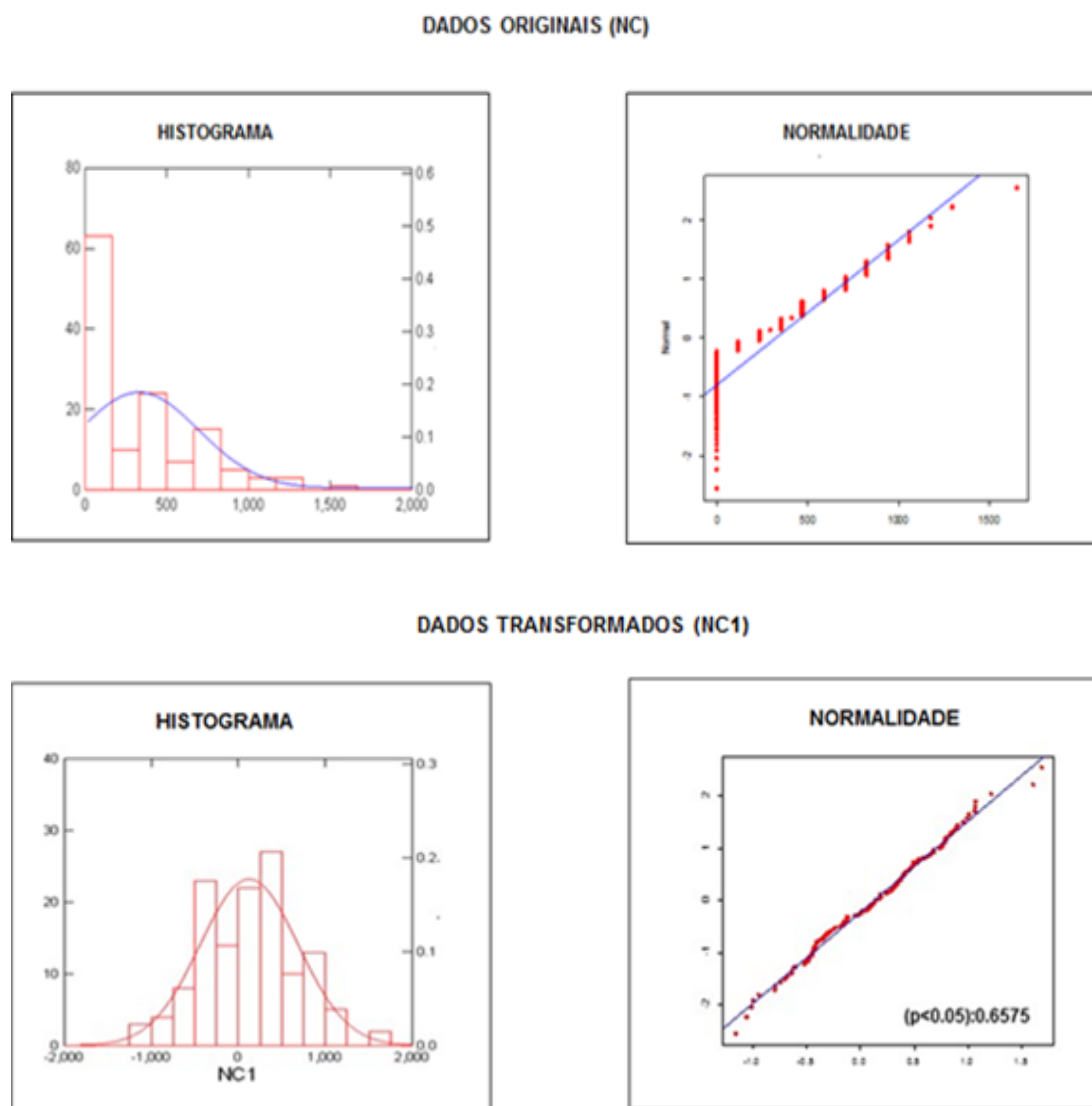
A observação de altos valores de CV em alguns atributos pesquisados deste trabalho não se traduziu na única estatística para analisar a variação dos dados. Nesse sentido, Souza et al., (2004) afirmam que o CV não é o meio mais adequado para representar a variabilidade espacial. Existe a necessidade de que as variáveis sejam associadas a testes de normalidade.

A Tabela (3) mostra que uma parcela dos atributos químicos apresentou uma distribuição "NO". Os atributos MO, S, Ca, Al, H+Al, SB, T, Ca/K e Mg/K que seguiram essa distribuição, obtiveram um p-valor variando de 0,08 a 0,81 no teste de Shapiro & Wilk (1965). Dessa forma, estes atributos podem ser representados pela média de seus valores. Os demais que apresentaram conjuntos de distribuição "NNO" devem ser representados por suas medianas.

Apesar de que a normalidade de dados não seja um requisito fundamental para a geoestatística (CORÁ & BERALDO 2004), estudos de Paz & Gonzalez et al (2001) esclarecem que a estimação por krigagem apresenta os melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita. É o atual caso da calagem na área de estudo, caracterizada por distribuição não normal ("NNO").

Ainda que essa exigência não seja adotada na maioria dos trabalhos de agricultura de precisão, Landim (2011) ressalta que a krigagem ordinária só pode ser aplicada diretamente aos dados originais, nos casos em que se tenha amostras com distribuição normal ou que apresentem assimetria negativa. Dada a forte assimetria positiva, os dados necessitaram ser transformados. A representação dessa condição pode ser vista na Figura (7) abaixo.

Figura 7. Histograma e teste de normalidade de dados originais e transformados da necessidade de calagem (NC) na área de estudo.



4.3 Atributos físicos do solo

Na Tabela (4) são apresentados os dados referentes aos atributos físicos do solo

Tabela 4. Estatística descritiva de atributos físicos da área de estudo de 0 a 0,20 m

	un	Mínimo	Média	Máximo	Desv pad	CV	Assim	Curtose	p<0.05	TD
AR	g.kg ⁻¹	500,00	538,97	580,00	23,629	4,38	0,2924	-0,8423	0,0000	NNO
SL	g.kg ⁻¹	25,00	34,43	75,00	15,586	45,27	1,4135	0,8183	0,0000	NNO
AG	g.kg ⁻¹	345,00	425,92	475,00	29,324	6,89	-0,3895	-0,3764	0,0000	NNO
DS	kg.dm ⁻³	0,84	1,10	1,37	0,113	10,27	-0,0645	-0,5503	0,0275	NNO
DP	kg/dm ³	2,27	2,58	2,91	0,132	5,11	0,2387	0,1831	0,0174	NNO
PT	m ³ .m ⁻³	0,43	0,57	0,67	0,047	8,30	-0,2555	-0,1798	0,3540	NO
UV	m ³ .m ⁻³	0,15	0,32	0,53	0,055	17,10	0,4761	1,7412	0,0004	NNO
UG	kg.kg ⁻¹	0,17	0,29	0,42	0,037	12,64	-0,4486	2,1312	0,0000	NNO
RP	MPa	0,77	1,48	2,31	0,297	20,07	0,4421	0,0937	0,0456	TN

AR: teor de areia; SL: Teor de silte; AG: Teor de argila; DS: Densidade do solo; DP: Densidade da partícula; PT: Porosidade total; UV; Umidade volumétrica; UG: Umidade gravimétrica; RP: Resistência à penetração do solo; Normalidade: (p< 0.05) por Shapiro-Wilk a 5%; TD: Tipo de distribuição; amostragem de 0 a 0,20 m.

4.3.1 Valores médios dos atributos físicos

Dentro os dentro dos resultados observados na Tabela (4), a densidade do solo (1,10 kg.dm⁻³) está adequada ao teor de argila e não expressa problemas de compactação de solo.

Isso está bem abaixo do valor estabelecido por Andrade et al. (2005), que afirmaram que a maioria das culturas é seriamente afetada quando a densidade do solo ultrapassa 1,5 g cm⁻³, essencialmente por duas razões: primeiro, pela falta de O₂ para respiração das raízes, devido à baixa porosidade e má drenagem; segundo, por impedimento mecânico para o crescimento das raízes, limitando a zona de absorção de água e nutrientes.

A densidade de partícula média obtida nas análises de 2,58 está dentro do intervalo de 2,50 a 5,20 kg.dm⁻³, característico de solos minerais (FERREIRA & DIAS JÚNIOR, 1996).

4.3.2 Variabilidade dos Atributos físicos de solo

De uma maneira geral, os atributos apresentaram baixos coeficientes de variação, exceção ao silte com CV (45,27%). Apesar de que a média dessa fração do solo tenha sido baixa 34,43 g.kg⁻¹, existem diferenças nesses

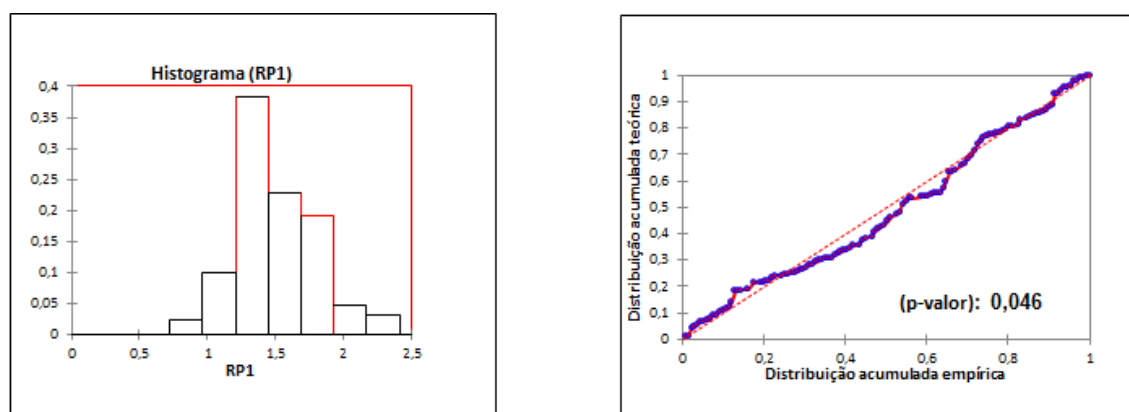
teores por causa de variações nas metodologias de laboratório. Um incremento na exatidão dos teores de silte somente se verifica quando se acrescenta o procedimento de análise da suspensão (silte + argila) nas determinações laboratoriais (RUIZ, H. A. 2005).

4.3.3 Distribuição de Frequências dos atributos físicos

Da mesma forma que verificado em parcela significativa das análises químicas, observa-se que a maior parte dos atributos físicos do solo da (Tabela 4), não seguiu uma distribuição normal, exceção feita à porosidade total (PT) e (RP), tendendo à normal.

Esse comportamento de não normalidade pode ser verificado por coeficientes positivos maiores que zero de C_s (assimetria positiva) e menores que zero de C_s (assimetria negativa). Os coeficientes de curtose (C_k) obtidos representam curvas platicúrticas ($C_k > 0.263$) e leptocúrticas ($C_k < 0.263$). Dentro dessas distribuições, um exemplo de tendência a normalidade é representado pelo atributo (RP) na Figura (8).

Figura 8. Histograma e teste de normalidade de (RP) na área de estudo



4.4 Análise da produtividade de grãos

Além do estudo das variáveis independentes (atributos), a produtividade de grãos na área de estudo (dependente) mostrou certa variabilidade. Esse resultado é importante, pois se não houvesse variabilidade da produtividade de grãos, a estratégia adequada de manejo nessa área seria representada pela média ou a mediana, e a melhor forma de manejá-la seria

através da agricultura convencional (COELHO, 2003). Os dados da produtividade de grãos podem ser conferidos na Tabela (5) abaixo.

Tabela 5. Análise da produtividade de grãos na área de estudo

	un	Média	Valores		desv pad	CV (%)	Coeficientes			TD
			Mínimo	Máximo			Assim	Curtose	p<0.05	
PRO	kg.ha ⁻¹	3246	2510	3910	292.39	9.01	-0.1475	-0.3204	0.1836	NO

4.4.1 Valores médios da produtividade de grãos

Os resultados na Tabela (5) mostram que a produtividade média foi de 3.246 kg.ha⁻¹. Esse valor está na faixa das melhores produtividades de lavouras similares na região. Além disso, os rendimentos obtidos estão de acordo com a fertilidade da área e o menor potencial produtivo da variedade precoce semeada na área de estudo.

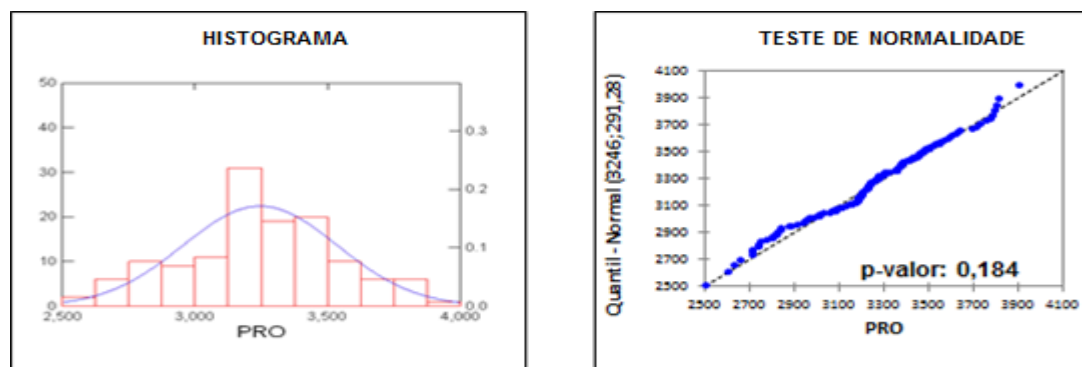
4.4.2 Variabilidade da produtividade de grãos

Apesar do CV obtido de apenas 9,01%, a produtividade variou de 2.510 a 3.910 kg.ha⁻¹, representando uma diferença de 1.410 kg.ha⁻¹. O baixo CV do rendimento obtido na área do trabalho reflete reduzida heterogeneidade, quando comparada a lavouras no RS manejadas com agricultura de precisão que apresentaram variação de 23 a 87 sc.ha⁻¹ em lavouras de Não me Toque, RS (THOMAS & COSTA, 2010).

4.4.3 Distribuição de frequências da produtividade de grãos

A distribuição de frequências e o teste de normalidade indicaram distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk com p-valor de 0,184 para a produtividade de grãos. Essas estatísticas são apresentadas na Figura (9).

Figura 9. Histograma e teste de normalidade da produtividade de grãos na área de estudo.



4.5. Análise de regressão entre os atributos

4.5.1 Atributos químicos x atributo de planta

Na Tabela (6) é apresentado o primeiro grupo de atributos químicos relacionados com a produtividade de soja na área de estudo.

Tabela 6. Matriz de correlação de Pearson de atributos químicos (I) de solo na área de estudo

	Coeficiente de correlação ^(a)											
	PRO	pH	Ca	Mg	K	AP	SB	T	V	CaMg	CaK	MgK
pH	-0,026											
Ca	-0,200*	0,338**										
Mg	-0,106	0,458**	0,556**									
K	-0,075	0,132	-0,088	0,025								
AP	0,013	-0,739**	-0,238**	-0,371**	-0,007							
SB	-0,205*	0,389**	0,954**	0,744**	0,040	-0,255						
T	-0,158	-0,224**	0,668**	0,300**	0,012	0,563**	0,623**					
V	-0,134	0,712**	0,771**	0,690**	0,030	-0,761**	0,801**	0,105				
CaMg	-0,066	-0,211*	0,243**	-0,567**	-0,060	0,218*	0,108	0,211*	-0,096			
CaK	-0,053	0,132	0,649**	0,332**	-0,746**	-0,159	0,523**	0,341**	0,455**	0,154		
MgK1	-0,009	0,200*	0,437**	0,616**	-0,672**	-0,258*	0,437**	0,160	0,436**	-0,281**	0,818**	
NC	0,138	0,717**	-0,766**	-0,679**	-0,018	0,770**	-0,788**	-0,094	-0,998**	0,099	-0,458**	-0,435**

^(a) nível de significância; * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%

A Tabela (6) mostra que as correlações de Ca X PRO ($r=-0,200$) e SB ($r=-0,205$) foram significativas a 5%, sendo apontadas na matriz de Pearson, como as maiores correlações negativas com a produtividade de grãos.

A respeito da correlação negativa entre cálcio e a produtividade, diversos trabalhos mostram que a calagem excessiva além de elevar os teores trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, pode proporcionar desequilíbrios nutricionais de cátions na planta, principalmente, entre magnésio e potássio (Caires et al. 2002).

O potássio está envolvido na abertura e fechamento dos estômatos, na ativação de várias enzimas envolvidas na respiração e fotossíntese, e sua deficiência predispõe as plantas a maior ocorrência de doenças e decréscimo na produtividade de grãos (SFREDO et al., 2008).

Mas a calagem excessiva não prejudica apenas o K e os demais macronutrientes. De igual forma, pode existir diminuição na absorção de micros catiônicos.

Na Tabela (7) abaixo é apresentada nova matriz dos atributos químicos (II) que não foram relacionados na primeira matriz de correlação.

Tabela 7. Matriz de Correlação de Pearson de atributos químicos de solo (II) na área de estudo

	Coeficiente de Correlação ^(a)				
	PRO	MO	P	S	Al
MO	0.122				
P	-0.008	0.054			
S	0.088	0.064	0.049		
Al	-0.016	-0.124	0.163	0.079	
m	-0.033	-0,220*	0.161	0.076	0,874**

^(a) nível de significância; * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%

Dentre os resultados significativos da Tabela (7), pode ser ressaltado a correlação negativa entre m X MO ($r=-0,220$). Tal efeito, possivelmente, tenha sido favorecido pela manutenção da palhada de milho safrinha na superfície do solo, antes da soja. Isso é relatado por Caires et al. (2004), em áreas de plantio direto. Segundo os autores, existe menor concentração de Al^{3+} e AlOH^{2+} tóxicos e maior concentração de alumínio complexado a ligantes orgânicos, resultante da manutenção de resíduos vegetais na superfície do

solo em áreas de plantio direto. Assim, a matéria orgânica tem efeito na diminuição do alumínio tóxico e da saturação de alumínio (m) no solo.

4.5.2 Atributos físicos de solo x atributo de planta

Realizadas as análises anteriores, os resultados de atributos de solo foram cruzados com o mapa de produtividade. A matriz de correlação da produtividade e atributos físicos é apresentada na Tabela (8) abaixo.

Tabela 8. Matriz de correlação de Pearson de atributos físicos do solo na área de estudo

Atributos	Coeficiente de Correlação ^(a)								
	PRO	AR	SL	AG	DS	DP	PT	UV	UG
AR	0,072								
SL	-0,063	0,011							
AG	-0,022	-0,803**	-0,546**						
DS	0,066	-0,074	0,076	0,022					
DP	-0,054	-0,081	0,077	0,043	0,099				
PT	-0,093	0,031	-0,037	0,000	-0,899**	0,363**			
UV	0,195*	-0,081	-0,069	0,129	0,524**	0,064	-0,453**		
UG	0,108	0,038	-0,110	0,060	0,111	0,007	-0,099	0,595**	
RP	-0,130	-0,010	-0,053	-0,005	0,095	0,093	-0,047	-0,100	-0,158

^(a) nível de significância; ** significativo a 1%; * significativo a 5%

Dentre as correlações de atributos físicos com a produtividade obtidas na Tabela (8), pode ser destacado o resultado de UV x PRO ($r=0,195$) e a correlação negativa de RP x PRO ($r=-0,130$).

A correlação significativa direta obtida entre UV x PRO é relatada por Reinert et al., 2006. Para estes autores, o volume de água armazenado no horizonte explorado pelo sistema radicular não só influencia as demais propriedades do solo, mas também tem efeito direto sobre a produtividade dos cultivos.

Além da (UV), o segundo atributo destacado na Tabela (8) foi a resistência à penetração de raízes (RP), que apresentou coeficiente de

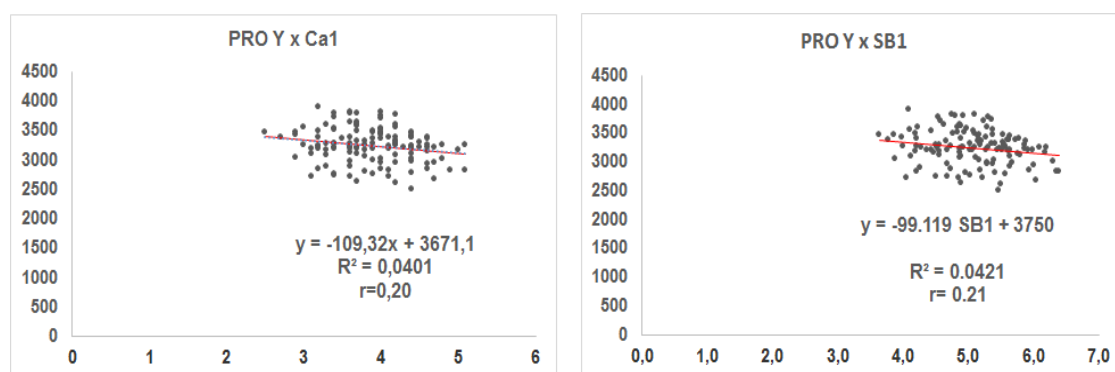
correlação negativo (r) com a produtividade de soja. A correlação de RP x PRO não foi significativa do ponto de vista estatístico.

Os valores médios de 1,48 MPa da RP obtidos na camada de 0 a 0,20 m do estudo, estão abaixo dos níveis considerados limitantes à produtividade vegetal. De uma maneira geral, valores acima de 2 MPa, são aceitos como críticos de resistência do solo a penetração de raízes, podendo ter flexibilidade de 2 a 5 MPa (CAMARGO e ALEONI, 1997); SILVA et al., 1998; REINERT et al., 2001).

4.5.3 Equações lineares de regressão

As equações que descrevem os atributos com efeitos antagônicos à produtividade na área de estudo estão representadas na Figura (10).

Figura 10. Equações de regressão das correlações Ca X PRO e SB x PRO da área de estudo



Ca1: Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); SB1: SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); PRO: produtividade de grãos (kg ha^{-1})

As equações na Figura (10) representam correlações significativas com maiores efeitos dentro do estudo. As equações traduzem uma linha de tendência de que o aumento dos teores de cálcio ou de soma de bases causa por conta de desequilíbrio nutricional decréscimo na produtividade de grãos.

4.6 Análise geoestatística dos atributos

Para estudar a produtividade e os atributos de solo do ponto de vista geostatístico, foi realizada análise semivariográfica conforme a Tabela (9).

Tabela 9. Análise semivariográfica da produtividade de grãos e dos atributos de solo na área de estudo.

Atrib	Mod	Co	Co + C	A ₀ (m)	r ²	SQR	ADE		Validação Cruzada		
							(%)	Classe	a	b	r ²
γ(h)simples de produtividade											
PRO	esf.	8,549x10 ⁴	1,203x10 ⁵	360,0	0,542	7,730x10 ⁸	0,289	baixo	621,27	0,806	0,068
γ(h)simples dos atributos químicos de solo (0 – 0, 20 m)											
pH	gau.	7,037x10 ⁻³	1,232x10 ⁻²	147,7	0,429	1,025x10 ⁻⁵	0,429	médio	0,33	0,933	0,13
MO	esf.	9.710	2,060x10	476,0	0,900	8.490	0,529	médio	-5,62	1.126	0,397
P	gau.	3.481	6.313	190,0	0,698	1.700	0,449	médio	1,53	0,863	0,168
S	exp.	1,660x10 ⁻¹	1.063	255,0	0,648	1,030x10 ⁻¹	0,844	muito alto	0,35	1.152	0,374
Ca	esf.	2,200x10 ⁻¹	2,900x10 ⁻¹	380,0	0,612	1,544x10 ⁻³	0,241	baixo	-0,04	1.011	0,055
Mg	esf.	9,404x10 ⁻³	2,000x10 ⁻²	230,0	0,604	2,571x10 ⁻⁵	0,53	médio	0,12	0,861	0,195
K	epp	3,781x10 ⁻³	3,781x10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	esf.	1,580x10 ⁻⁴	2,290x10 ⁻⁴	196,1	0,29	2,571x10 ⁻⁵	0,31	baixo	0,00	1	0,081
AP	esf.	2,267x10 ⁻¹	3,381x10 ⁻¹	390,0	0,594	4,325x10 ⁻³	0,33	baixo	0,00	1.001	0,175
SB	gau.	2,406x10 ⁻¹	3,640x10 ⁻¹	160,0	0,542	5,886x10 ⁻³	0,339	baixo	-0,01	1.001	0,091
T	esf.	3,672x10 ⁻¹	5,700x10 ⁻¹	220,0	0,443	1,230x10 ⁻²	0,356	baixo	2,16	0,793	0,070
V	gau.	1,457x10	2,190x10	342,1	0,689	1,660x10	0,294	baixo	1,83	0,961	0,118
m	gau.	1,110x10 ⁻¹	1,884x10 ⁻¹	210,0	0,761	1,182x10 ⁻³	0,416	médio	0,16	0,857	0,122
Ca/Mg	esf.	1,757x10 ⁻¹	4,064x10 ⁻¹	341,0	0,83	4,782x10 ⁻³	0,568	médio	-0,18	1.041	0,316
Ca/K	esf.	7.525	1,108x10	288,3	0,486	5.200	0,321	baixo	0,31	0,975	0,125
Mg/K	esf.	2,440x10 ⁻¹	5,730x10 ⁻¹	295,0	0,609	2,450x10 ⁻²	0,574	médio	0,28	0,901	0,254
NC	esf.	2,173x10 ⁻¹	3,228x10 ⁻¹	408,7	0,634	5,095x10 ⁻³	0,327	baixo	0,01	1,000	0,119
γ(h)simples dos atributos físicos de solo (0 – 0, 20 m)											
AR	esf.	3,978x10 ²	5,771x10 ²	360,0	0,672	1,243x10 ⁴	0,311	baixo	3,05	0,994	0,167
SL	epp	2,287x10 ²	2,287x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
AG	gau.	6,417x10 ²	8,400x10 ²	360,0	0,577	1,788x10 ⁴	0,236	baixo	39,38	0,908	0,129
DS	esf.	7,900x10 ⁻⁴	1,368x10 ⁻²	269,0	0,949	4,101x10 ⁻⁶	0,942	muito alto	-0,01	1.009	0,582
DP	epp	1,788x10 ⁻²	1,788x10 ⁻²	-	-	-	-	-	-	-	-
PT	esf.	1,080x10 ⁻³	2,370x10 ⁻³	310,0	0,921	8,558x10 ⁻⁸	0,544	médio	-0,03	1.058	0,301
UV	epp	1,788x10 ⁻²	1,788x10 ⁻²	-	-	-	-	-	-	-	-
UG	esf.	2,070x10 ⁻⁴	3,164x10 ⁻³	144,0	0,446	7,941x10 ⁻⁷	0,935	muito alto	0,06	0,801	0,267
RP	gau.	4,640x10 ⁻²	9,680x10 ⁻²	383,8	0,881	2,793x10 ⁻⁴	0,521	médio	0,01	1.003	0,364

Gau: modelo gaussiano; Esf: esférico; Exp: exponencial; Co: Efeito pepita; Co + C: patamar; r²: coeficiente de determinação do modelo experimental; SQR: Soma de quadrados dos resíduos; ADE: Avaliador da dependência espacial; Validação cruzada, (a): transecto; (b): coeficiente angular e (r²): coeficiente de determinação.

De uma maneira geral, observa-se na Tabela (9) que a maior parte dos atributos apresentou dependência espacial, exceção feita ao K, SL, DP e UG com efeito pepita puro. Nestes casos específicos, o comportamento dessas variáveis foi totalmente aleatório, revelando a descontinuidade dos semivariogramas para distâncias menores que as amostradas.

Outra análise que se pode destacar na mesma tabela, diz respeito ao objetivo mais importante da modelagem espacial que é a determinação do alcance. Os resultados indicaram que todos os atributos obtiveram alcances (m) de dependência espacial superiores a malha de amostragem de 01 amostra a cada 63 m (0,4 ha). Os menores alcances foram obtidos no pH, SB, P com 147, 160 e 190 m, respectivamente. No caso dos atributos físicos, o menor valor foi de UG com 144 m. Isso pressupõe que uma malha de amostragem superior a 2,0 ha não seria suficientemente detalhada para representar a variabilidade da área de estudo por completo.

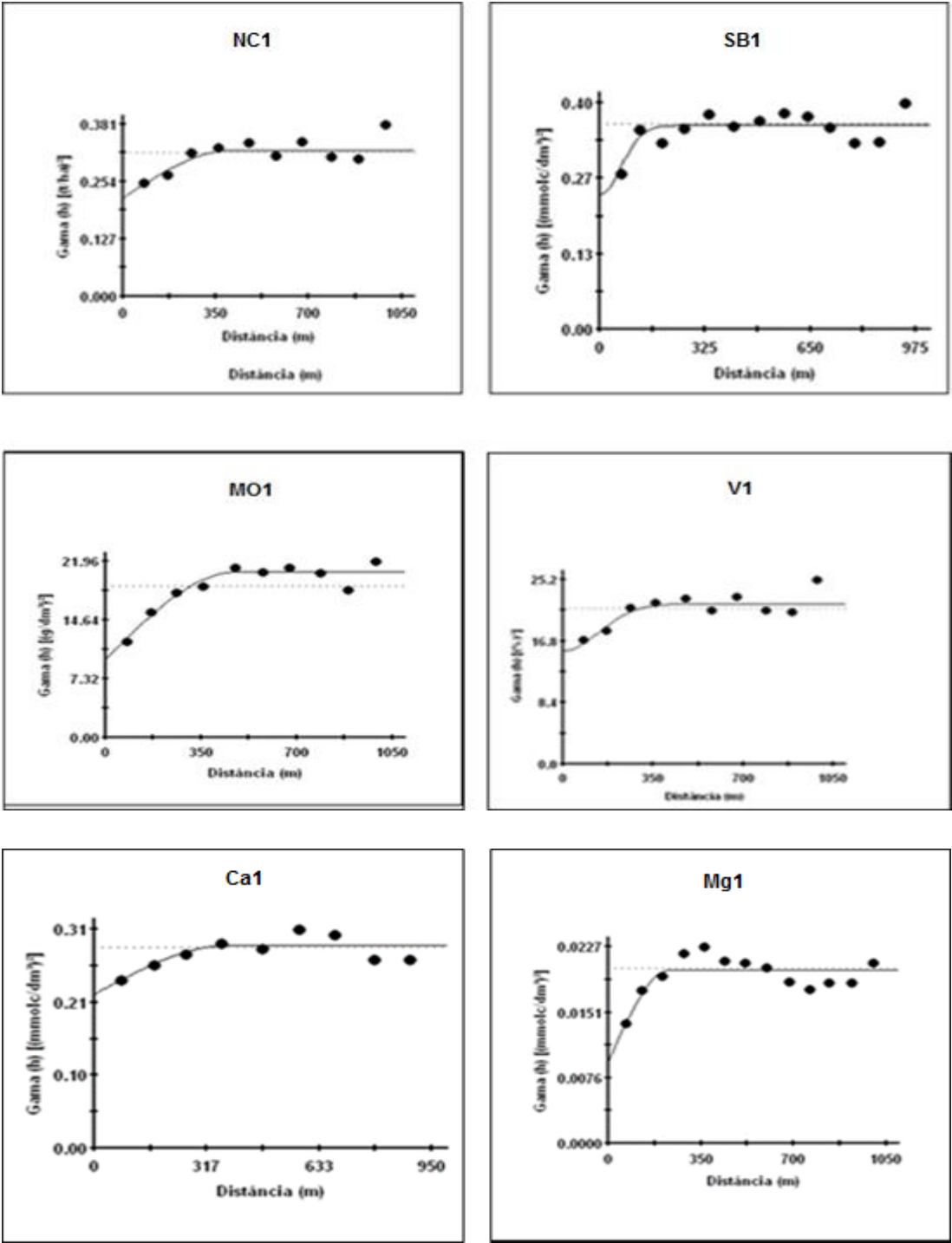
Mas a determinação do alcance não garante por si só qualidade dos mapas de krigagem. Por efeito de escala, o uso de informações com baixa densidade amostral, acaba por diminuir a variabilidade espacial com efeito no total de corretivos e fertilizantes aplicados (GIMENEZ, L. et al., 2012).

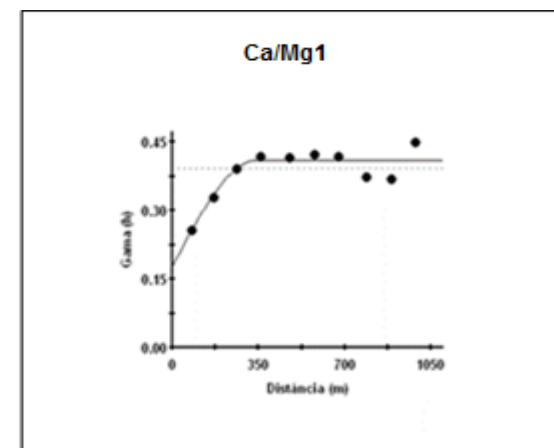
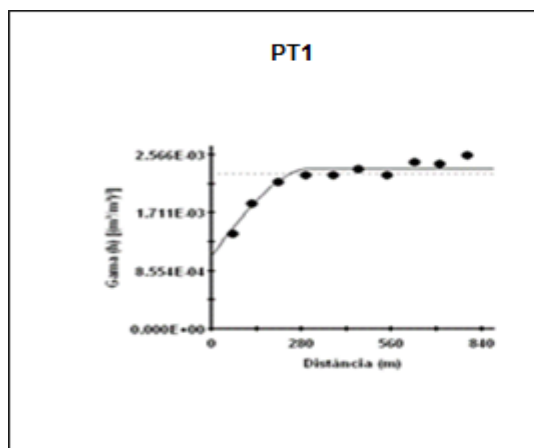
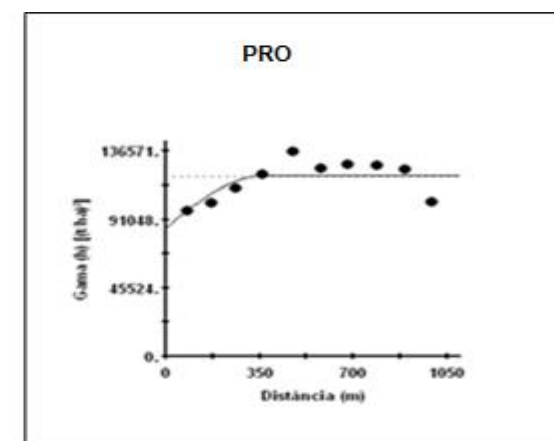
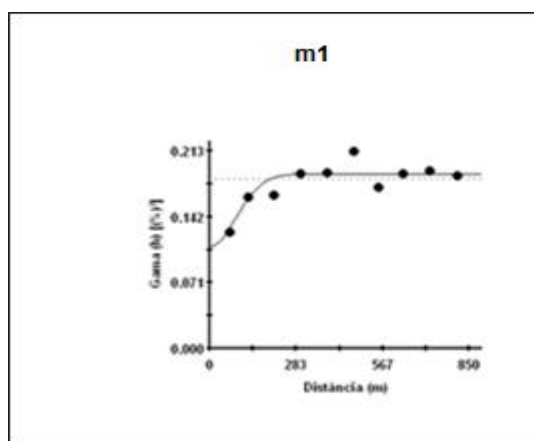
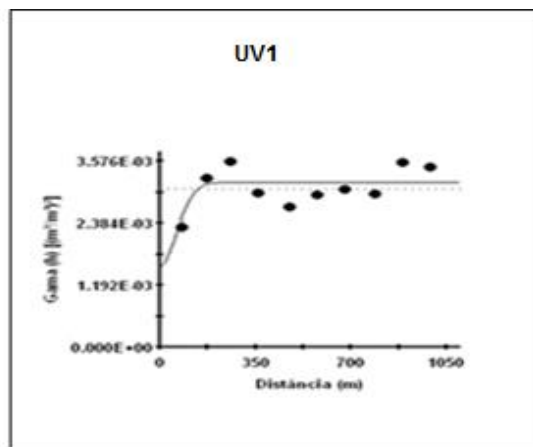
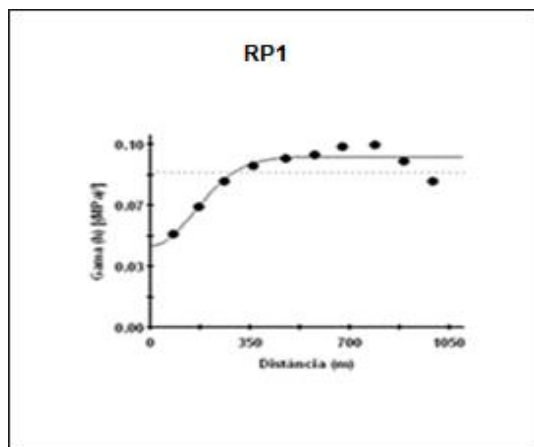
4.6.1 Semivariogramas simples

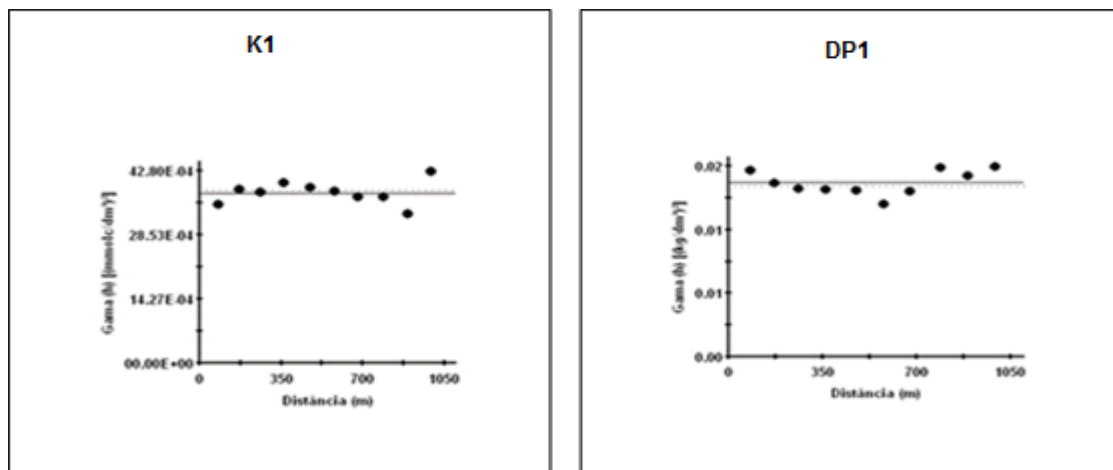
Os gráficos da Figura (11) mostram que, de uma forma geral, os semivariogramas simples estão bem ajustados aos modelos teóricos dos atributos do estudo. Estes ajustes foram bem configurados nas variáveis MO1, Ca1, Ca/Mg1, PT1, DS1, RP1, V1 e PRO, com pelo menos quatro pontos alocados na subida dos semivariogramas.

O ajuste de pontos em distâncias inferiores ao alcance é mais importante do que amostras além do alcance (ANDRIOTTI, J, L, 2010). Os atributos K1 e DP1 mostraram efeito pepita.

Figura 11. Representação gráfica de ajuste dos semivariogramas simples dos atributos de interesse na área de estudo







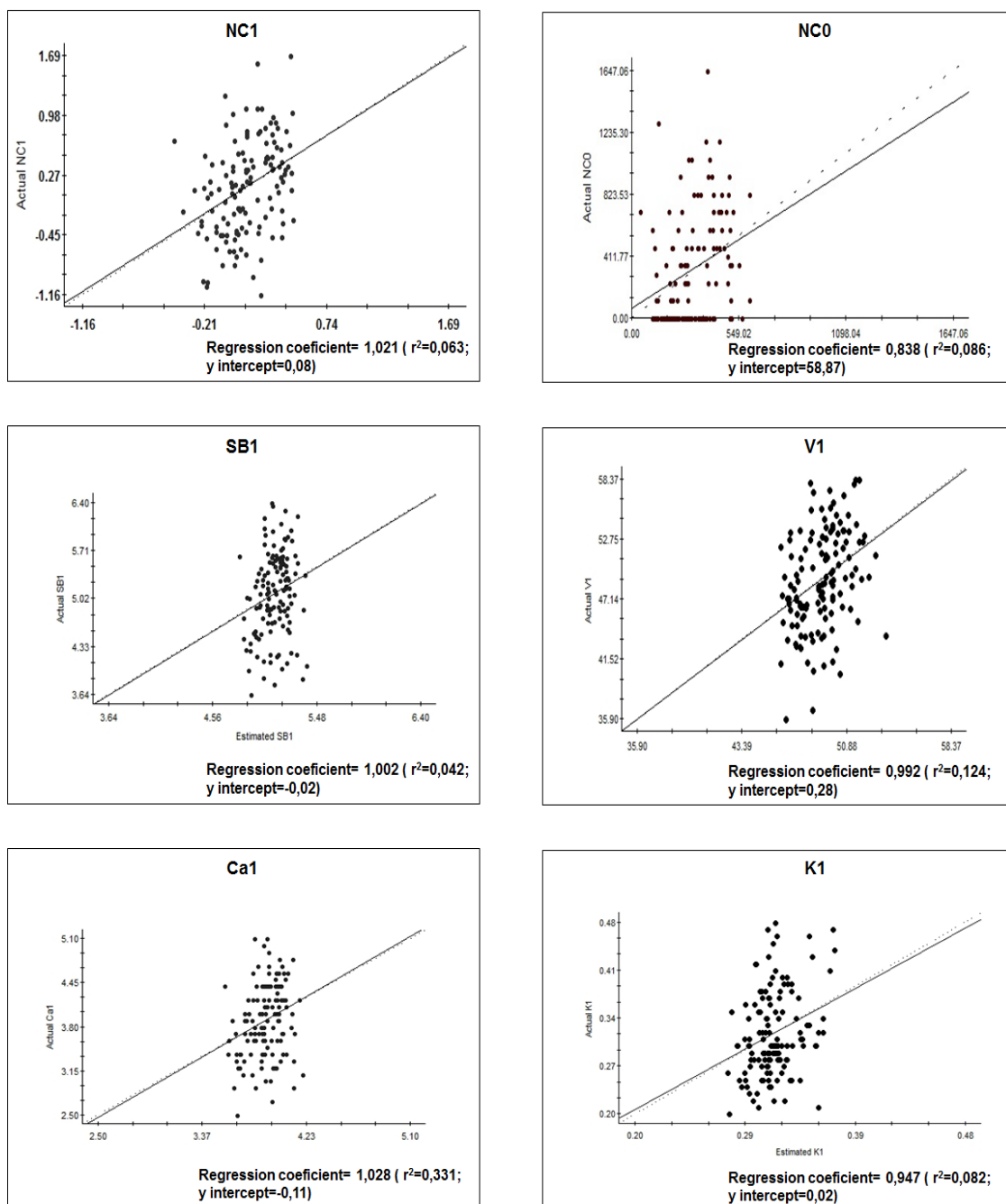
NC1: Necessidade de calagem; SB1: Soma de Bases; MO1: Matéria orgânica; V1: Saturação de Bases; Ca1: Cálcio; Mg1: Magnésio; RP1: Resistência a penetração; UV1: Umidade volumétrica; m1: Saturação de Alumínio; PRO: Produtividade de grãos; PT1: Porosidade total; Ca/Mg1: Ca/Mg; K1: Potássio; DP1: Densidade da partícula.

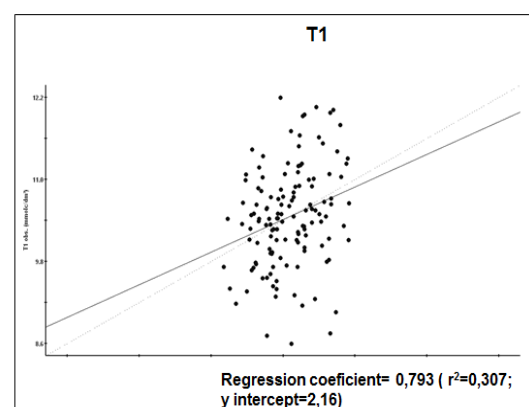
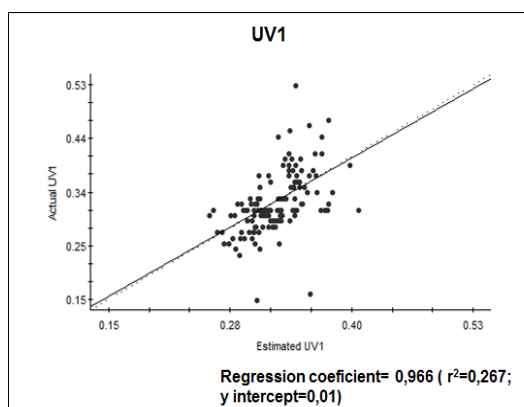
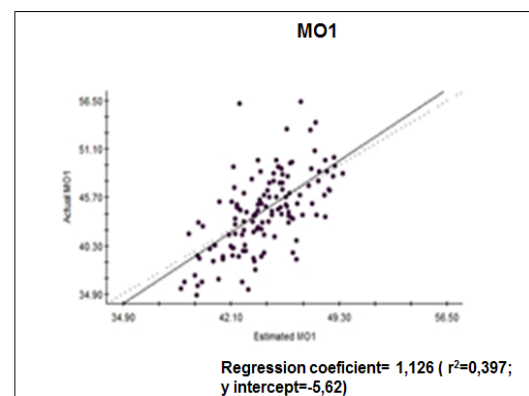
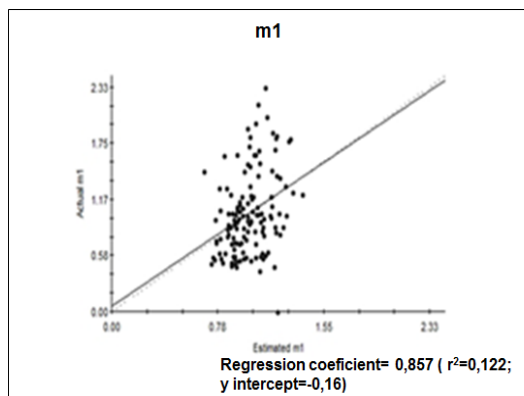
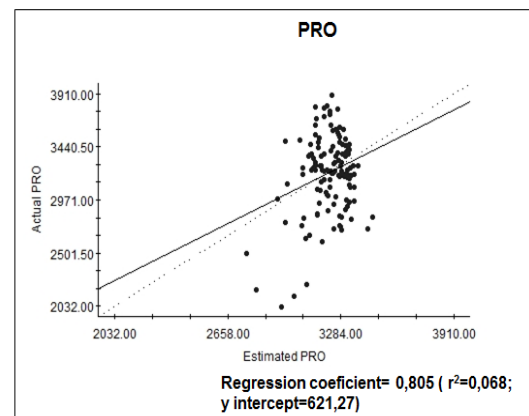
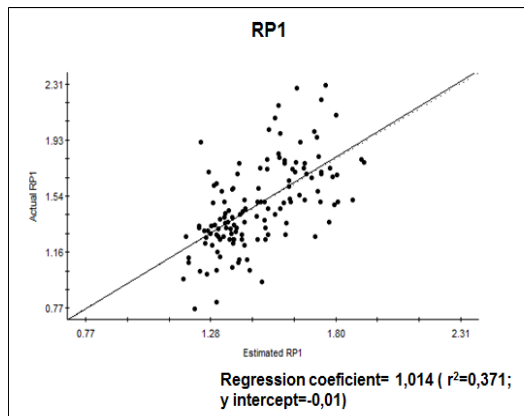
4.6.2 Validação cruzada dos semivariogramas Simples

Na figura (12) abaixo são apresentados os gráficos das validações cruzadas dos semivariogramas simples na área de estudo.

Os menores coeficientes de correlação (b) da validação cruzada dos semivariogramas simples foram registrados em (T1) e na produtividade de grãos (PRO) com valores de 0,793 e 0,806, respectivamente. A baixa dependência espacial observada na produtividade de grãos contradiz estudos de Freddi et al (2005). Segundo os autores, quando existe alta dependência espacial, a produtividade mostra que existe uma relação direta entre os atributos de solo associados ao clima e as características do cultivar.

Figura 12. Representação gráfica das validações cruzadas dos semivariogramas simples na área de estudo



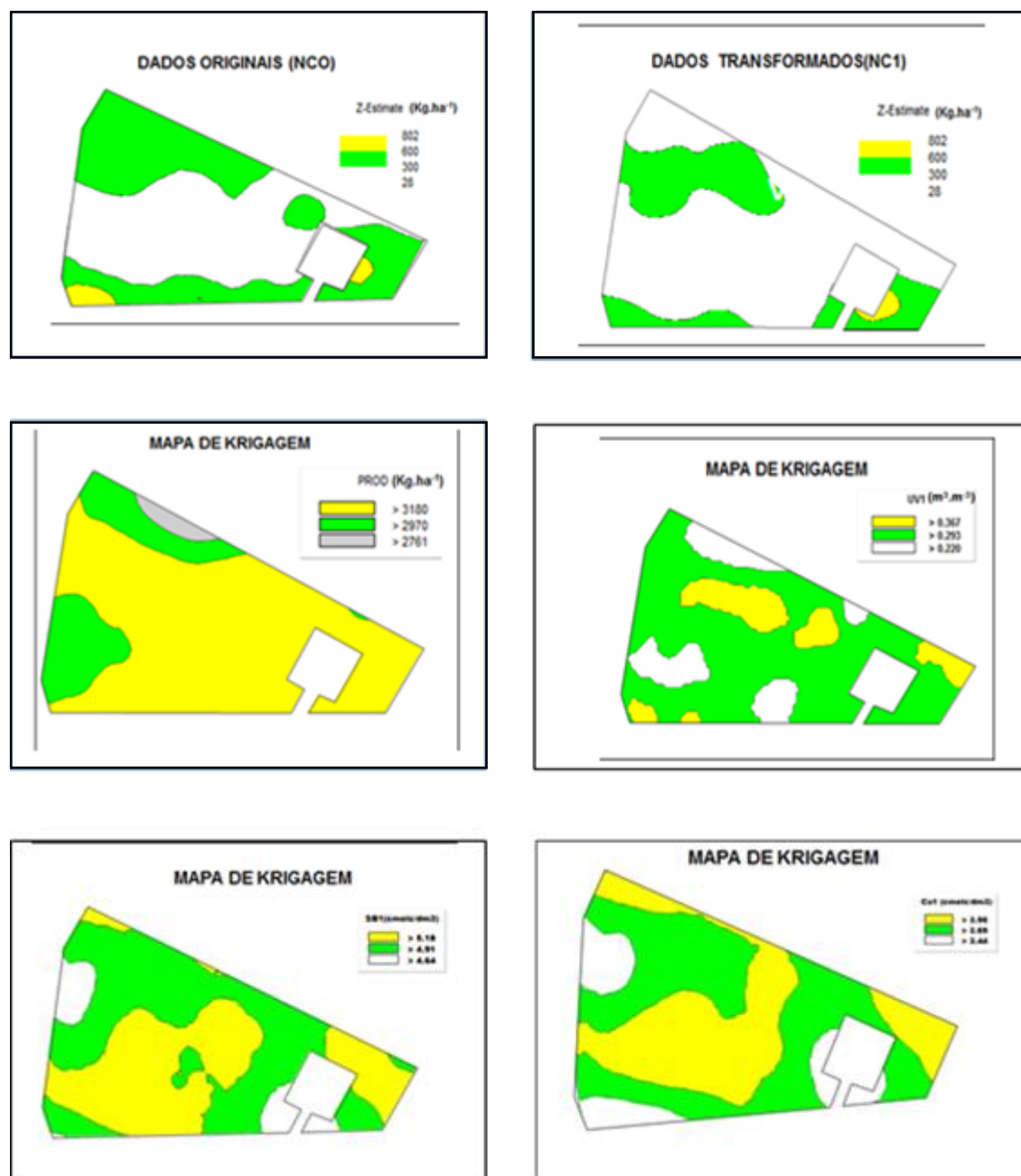


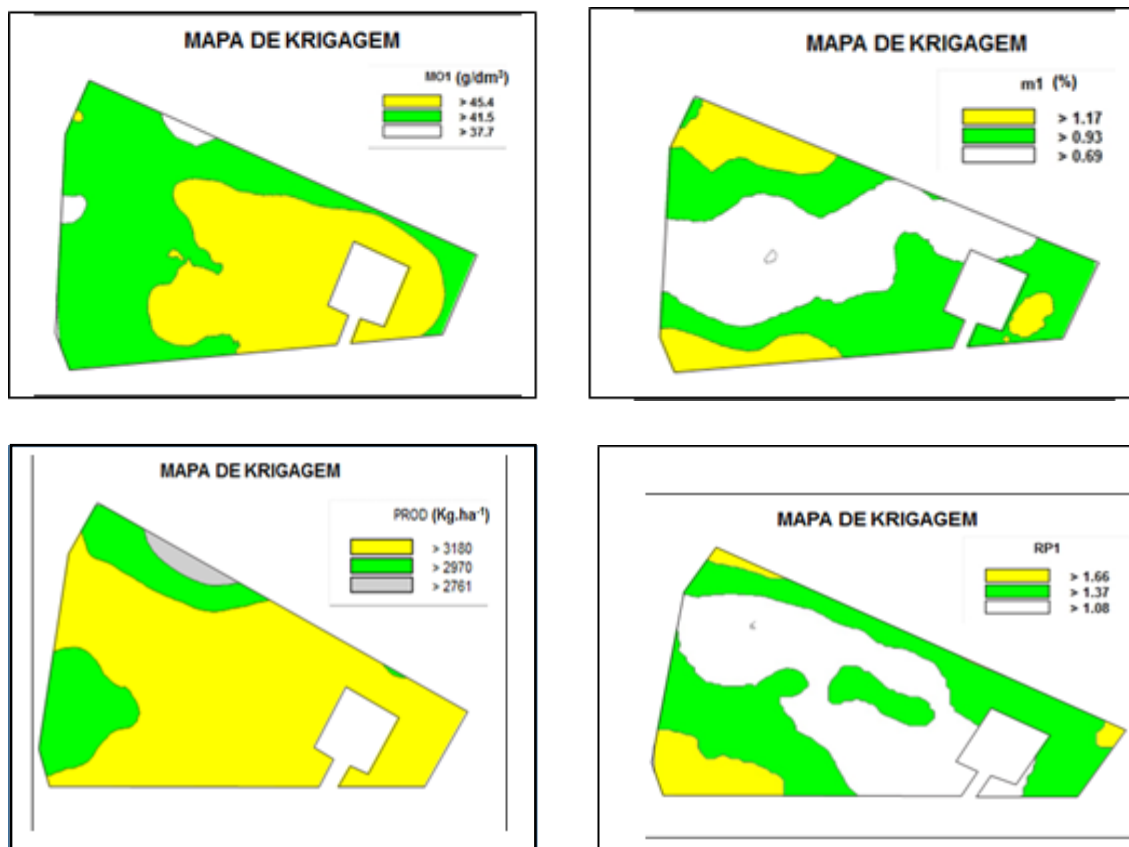
4.6.3 Mapas de krigagem

O critério para a elaboração dos mapas de krigagem do estudo foi a classificação destes no teste de significância estatística da matriz de correlação linear. A matriz de correlação linear do estudo indicou que dentro de todas as variáveis analisadas, os atributos m1 x MO1, UV1 X PRO, Ca1 X PRO, SB1 x PRO apresentaram significância estatística, sendo estes representados nos mapas de krigagem.

Além desses atributos, os mapas de (NC) inseridos na Figura (13) expressam os efeitos decorrentes da transformação dos dados originais com a recomendação de calagem.

Figura 13. Mapas de Krigagem de interesse na área de estudo





Quando se fez a transformação dos dados originais de (NC) constantes na Tabela (13), o novo conjunto de dados, além de atender a distribuição gaussiana possibilitou um histograma mais simétrico, suavização do variograma experimental, e concentração de pontos distantes da origem dos eixos cartesianos nas validações cruzadas dos semivariogramas simples.

Em decorrência da transformação dos dados originais, conforme pode ser visto nos mapas apresentados, foi observada significativa diminuição de calcário nos mapas resultantes de krigagem. Do ponto de vista prático, isso tem implicações não só na questão econômica, mas também na dose adequada de nutrientes que proporcionam maior produtividade (MONTOVANI, 2000).

4.6.4 Semivariogramas cruzados e cokrigagem

Apesar de que os atributos Ca X PRO e SB X PRO tenham sido adequadamente mensurados nos mapas digitais e interpretados pelas retas de regressão, as estimativas das correlações negativas dessas variáveis com

a produtividade exigiram maior detalhamento. Para melhorar essa estimativa, foi utilizada a Cokrigagem. Os parâmetros da cokrigagem estão representados na Tabela (10).

Tabela 10. Parâmetros de semivariogramas cruzados e validações cruzadas para atributos de solo de maiores correlações com a produtividade de grãos na área de estudo

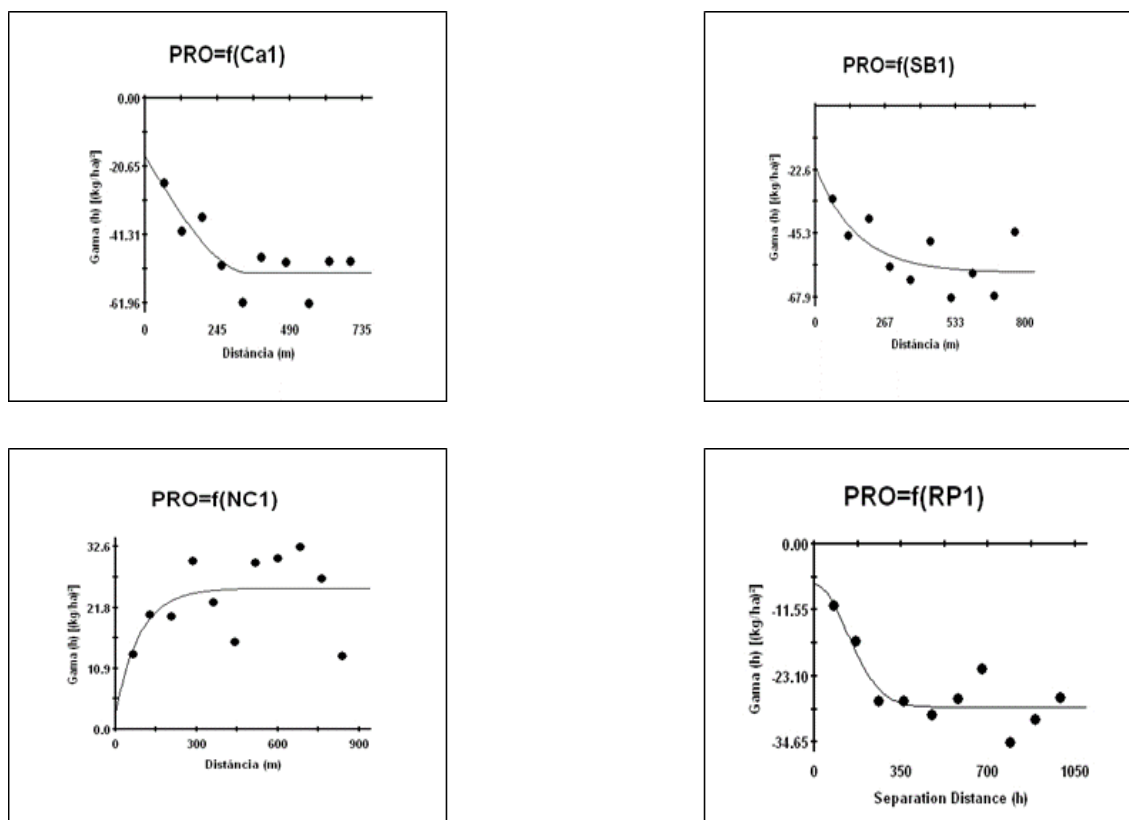
Atributo	Mod	Co	Co+C	Ao (m)	r^2	SQR	ADE		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r^2
PRO= f(Ca)	esf.	-17,500	-52,960	356,0	0,722	$3,090 \times 10^2$	0,670	médio	$1,411 \times 10^3$	0,561	0,117
PRO= f(SB)	exp.	-23,300	-59,170	465,0	0,515	$6,240 \times 10^2$	0,640	médio	$1,407 \times 10^3$	0,562	0,117
PRO= f(NC)	exp.	2,890	2,520	270,0	0,25	$3,850 \times 10^2$	0,883	mta alto	$1,407 \times 10^3$	0,562	0,117
PRO= f(RP)	gau	-7,080	-28,490	365,6	0,759	$1,030 \times 10^2$	0,751	alto	$1,407 \times 10^3$	0,562	0,117

Os atributos Ca X PRO e SB X PRO foram os que mostraram os maiores efeitos antagônicos com a produtividade de soja na correlação linear.

Na Figura (14), observa-se que os atributos de PRO=f(NC1) e PRO=f(RP1) apesar de apresentaram alta dependência espacial na cokrigagem, não foram significativos na correlação linear. Com a exclusão desses, os resultados das cokrigagens evidenciam o caráter negativo das variáveis secundárias de Ca1 e SB1 sobre a produtividade (PRO).

O melhor ajuste semivariográfico foi obtido com modelo esférico de PRO em função de (Ca1), atestado por um ($r^2=0,722$) dos semivariogramas cruzados, índice de dependência espacial da ordem de 67,0 % e coeficiente de correlação da validação cruzada de 0,561. Assim, 72,2 % da variabilidade da produtividade de soja pode ser explicada pela variabilidade do teor de cálcio no solo.

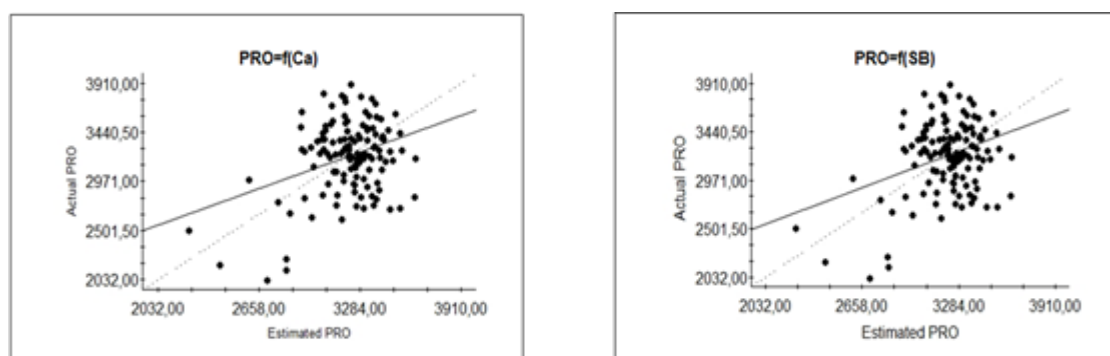
Figura 14. Semivariogramas cruzados dos atributos de interesse na área de estudo

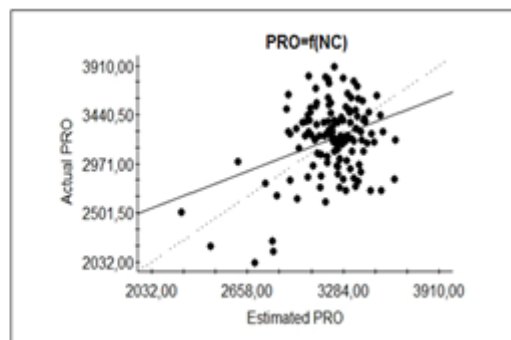
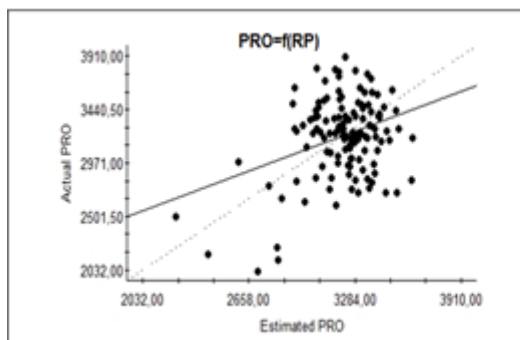


4.6.5. Validação cruzada dos semivariogramas cruzados

Na figura (15), a validação cruzada da cokrigagem mostra a diferença entre os valores reais e os estimados. O coeficiente de correlação (b) de 0,560 e $r^2 = 0,117$ dos atributos correlacionados indicam que os erros decorrentes dessa estimação são aceitáveis considerando o número elevado de pontos amostrados.

Figura 15. Validação dos semivariogramas cruzados

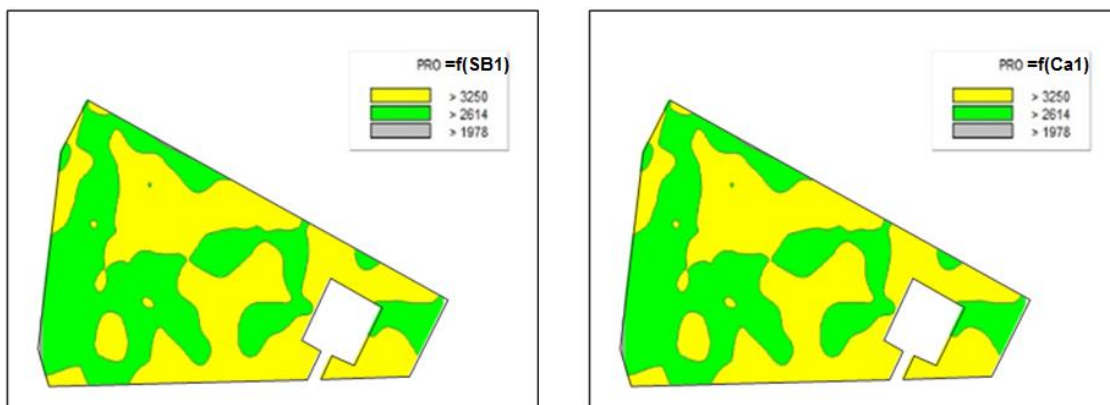




4.6.6 Mapas de cokrigagem

Os mapas de cokrigagem indicam que nas áreas onde os teores de cálcio e soma de bases trocáveis do solo são mais elevados, a produtividade de grãos decresce, sendo o inverso de igual forma válido. Os mapas de desses atributos significativos podem ser vistos na Figura (16) abaixo.

Figura 16. Mapas de cokrigagem da área de estudo



O antagonismo do cálcio com os demais nutrientes do solo e seus efeitos negativos sobre a produtividade de grãos é relatado em diversos trabalhos.

Watanabe et al. (2005) verificaram que relações de cátions equilibradas nos sítios de troca aumentaram a produtividade de soja em um Latossolo Distroférico no Paraná.

Em estudos com a cultura de milho no plantio direto, Caires et al (2002) observaram redução na concentração de potássio nas folhas com o aumento

da relação $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$ no solo (0-20 cm), em decorrência da aplicação de calcário dolomítico. Resultados semelhantes, relacionados a influência do cálcio e magnésio na absorção do potássio pelo milho, também foram observados nos trabalhos de Andreotti et al (2000). Mas os efeitos negativos não se limitam apenas as relações catiônicas.

Doses excessivas de calcário, podem ocasionar deficiências de micronutrientes nas plantas (TANAKA; MASCARENHAS; BULISANI, 1992). Da mesma forma, Korndörfer H.G (1999) diz que uma saturação de bases maior que 60%, existe decréscimo da produtividade de soja e poderá induzir a deficiências de Zinco, Cobre e Manganês.

Entre os micronutrientes, o manganês é o mais afetado por aplicação de altas doses de calcário (Caires; Fonseca 2000). Isso ocorre porque o aumento de pH do solo com a calagem muda a forma de absorção do Mn, passando de Mn^{2+} para formas menos disponíveis para as plantas. No entanto, os mesmos autores esclarecem que em solos com boa disponibilidade do micronutriente, não houve decréscimo na produtividade de soja e milho por causa da menor concentração de Mn nas folhas desses cultivos.

Outro aspecto igualmente importante na relação dos nutrientes do solo, diz respeito a atual recomendação de calcário, com amostragem de solo de 0 a 20 cm, mas aplicada em dose total de forma superficial no plantio direto. Isso evidentemente, pode ter agravado o desequilíbrio nutricional da cultura na área de estudo, pelo significativo gradiente da saturação de bases na superfície em relação as camadas subsuperficiais.

Dalla Nora et al. (2013), em estudo de longa duração no plantio direto, observaram que a saturação de bases por conta de calcário superficial, alcançou valores de 70 a 80% na camada de 0 a 0,05 m; (V%) de 60% na camada de 0,05 a 0,10 m e (V%) de 40% na camada até 0,15m de profundidade do solo. Isso origina um forte gradiente, podendo ocasionar desequilíbrios nutricionais.

Para corrigir essa questão, diversos autores recomendam amostragem de solo estratificada e diminuição das doses de calcário por ocasião da recalagem em áreas de plantio direto (LOPES, 1999; CAIRES et.al, 2005).

Apesar de que a maior parte das pesquisas não endossem o efeito das relações entre Ca/Mg, Ca/K e Mg/K sobre a produtividade, os resultados do estudo estão em conformidade a diversos trabalhos que ressaltam a necessidade de que as relações catiônicas sejam melhor estudadas e compreendidas.

5. CONCLUSÕES

Dentre os fatores analisados, o elevado teor de cálcio e a soma de bases no solo constituíram-se em atributos determinantes das zonas específicas de manejo que melhor explicam a produtividade de grãos de soja local. Tal variação da produtividade deve-se ao desbalanço nas relações de Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo, e possivelmente a diminuição de micronutrientes metálicos.

Portando, ainda que de forma inversa, nos sítios onde ocorreram os maiores teores de cálcio e da soma de bases verificaram-se as menores produtividades de soja, sendo o inverso perfeitamente válido.

Aplicações superficiais de calcário em áreas de plantio direto com elevados teores trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas superficiais podem acentuar esses prejuízos, os quais são potencializados pela não realização de adubação potássica.

Não foram observadas interações significativas antagônicas dos atributos físicos com a produtividade de grãos na área de estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Rothamsted Experimental Station, vol 46:161-168, 1995.

ALLEY, M.M.; 1996. **Better Crops**, 80 (1):6-7.

ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação de bases e da adubação potássica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, DF. v.35. n.12.p. 2437-2466, 2000

ANDRIOTTI, J. L.; Fundamentos de Estatística e Geoestatística. (ed.) Unisinos, São Leopoldo, RS, 2010. 165 p.

ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L. & ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda de TDR. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 7:173-176, 2005.

ANGHINONI, I. SALET, L.R. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema de plantio direto. In: NUERNBERG, N, J. (Ed). *Conceitos e fundamentos do plantio direto*. Lages: Núcleo Regional do Sul/SBCS, 1998. P.27-52.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 314–316.

ASMUZ, G. L.; INOMOTO, M.M.; Níveis de dados de nematóides. In: Sociedade Brasileira de Nematologia, (ed). **Nematóides de cisto da soja: a experiência brasileira**. Jaboticabal: Nematologia Brasileira, 1999, p. 71-81

BAYER, C. & MIELNICZUK., J. Características químicas do solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. *R.Bras. ci. Solo*, 21:235-239, 1997a.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.849-856, 2003.

BLACKMORE, B.S.; MARSHALL, C.J. Yield mapping; errors and algorithms. In: International Conference On Precision Agriculture, 3, Minneapolis, 1996. Proceedings, Madison, WI, 1996, p.403-415.

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 46, p. 2-36, 1991.

BUSSHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOKJA, R.E.; Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plan soil. **Soil and research tillage**. Amsterdam, v.2,p 205-217, 1997. +

CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A. F. Calagem em superfície no plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa/MG, v.24, n.1, p.161-169, 2000.

CAIRES, E.F.; BARTH, G. GARBUIO, F.J; KUSMAN, M.T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição de milho de acordo com a calagem na superfície no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, MG. v.26. n.4. p.1011-1022. 2002a.

CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A. BARTH, G. Surfade aplicattion of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison. v.97, n.03 p.791-798, 2005.

CAIRES, E.F. Efeito da calagem superficial sobre a disponibilidade de P no solo por Melich-1 e Resina. Apostilha de curso de especialização da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba/SP, 2008.

CALEGARI, A.; RALICH, R. Uso adequado de plantas de cobertura, rotação de culturas e seus benefícios no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n.97, p.13-16,2007

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. São Paulo: Divisão de biblioteca e documentação - ESALQ/USP, 1997. 132 p.

CANEVESE, G. Controle de Nematóides de Cistos na Cultura da Soja nos Cerrados do Brasil, 15 p. (Boletim Técnico nº. 1),1996.

COCHRANE, T.T.; AZEVEDO, L.G. As savanas do trópico sul-americano: uma visão geral dos seus recursos de clima e solo para desenvolvimento agrotecnológico baseada no inventário computarizado de sistemas de terra do CIAT/EMBRAPA. In: SIMPOSIO SOBRE O CERRADO, 1982, Brasília. Savanas: alimento e energia. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1988.

COELHO, A.M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In. Tópicos de Ciência do solo, vol. 3. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2003. p.249.

COELHO, A.M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Tópic. Ci. Solo**, Viçosa, v.3, p.249-290, 2003

COELHO, A.M. (2005) O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.612-658.

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

COELHO, A.M.; INAMASU, R.Y. Uso de sensores para o conhecimento de padrões do estado nutricional do milho para o manejo localizado de nitrogênio. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. 27, Londrina, 2008. **Anais...** Londrina: IAPAR; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.

CHANG, J.; CLAY, D. E.; CARLSON, C. G.; MALO, D.; CLAY, S.; LEE, J.; ELLSBURY, M. Precision farming protocols: Part 1. Grid distance and soil

nutrient impact on reproducibility of spatial variability measurements. **Precision Agriculture**, n. 1, p. 277 – 289, 1999.

CORÁ, J. B.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

CORÁ, J.E.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.374-387, 2006.

COSTA, L.M., JUCKSCH, I., GJORUP, G.B. **Fertilidade e manejo de solos**. In: Curso de especialização por tutoria à distância. Brasília-DF, ABEAS, 1996.

COSTA, J.C.; THOMAS, A.L.; Manejo para produtividade de grãos. Porto Alegre-Evangraf, 2010. 248 p.

DALLA NORA, D. D; AMADO, T. Gesso: alternativa para redistribuir verticalmente nutrientes no perfil do solo sob sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, v. 133, n. 1, p. 8-20, 2013.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; DIAS, P. W. Manejo de solo na entressafra para redução dos danos do nematoide de lesões radiculares em soja. XXIV Cong. Bras. Ci. Solo, 2013

DERPSCH,R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. Comparação entre diferentes métodos de preparo do solo. In: DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. (Ed.) **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Schborn: GTZ/Londrina: IAPAR, 1991. p.71-116

EMBRAPA-CPAC. Relatório Técnico Anual. Planaltina, 1991, v.5.190p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FARINA, M.P.W. & CHANNON, P. Acid - subsoil amelioration. II Gypsun effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Scienc Society American Journal**, 52:175-180, 1988.

FERREIRA, M.M. & DIAS JÚNIOR, M.S. Física do Solo. Lavras, UFLA, CAPES – PROIN, 1996, 86p.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 1, p. 61 – 67, 2005

FUNDAÇÃO CHAPADÃO DE PESQUISA. Boletim de pesquisa. ed. n. 01, safra 2007/2008.

FUNDAÇÃO MT. Boletim de pesquisa da soja 2013/14. ed. n. 47, Nov/Dez 2013. 346p.

GARCIA, A., J. F. V. Silva; PEREIRA, J. E. Pereira & LANTMANN A.F. Interação entre populações de *Heterodera glycines* e o pH do solo. *Nematologia Brasileira*, 21(1): 4.1997.

GIMENEZ, L.; ZANCANARO, L. Monitoramento da Fertilidade do solo em a técnica da amostragem em grade. *Informações agronômicas* n.138, junho 2012.

HAKANSSON, I. & LIPIEC, J.C. A rewiev of the usefullness of relative bulk density values in studies of soil structures and compaction. *Soil Till. Res.*, 53:71-83, 2000

HAMLETT, J. M. *et al.* Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 50, p. 868-875, 1986.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HILLEL, D. Environmental soil physics. New York, Academic Press, 1998. 770p.

KERTZMAN, F.F. Modificações na estrutura do solo e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação do solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1996. 176p. (Tese de Doutorado).

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

KORNDÖRFER, G.H.; COELHO, N.M.; SNYDER, G.H.; MITZANI, C.T. Avaliação dos métodos de extração de Silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. Ver. Bras. Ci de Solo. V.23, p.101-104, 1999.

KOCH, G.S. & LINK, R. F. Statistic analysis of geological data. Vol. 2, John Wiley and sons, New York, 1971. 438 p.

LABGIS, Núcleo de Geotecnologias da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), manual do curso de estatística espacial e geoestatística com ARCGIS for Desktop 10.3 Advanced, versão outubro 2014, SP. 82 p.

LANDIM, P. M.; YAMAMOTO, J.K.; Geostatística: conceitos + aplicações/ Jorge Kasuo Yamamoto; Paulo M. Barbosa Landim. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LAL, R.; LOGAN, T.J. & FAUSEY, N.R. Long term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained Mollic Ocharaqualf in Nortwest Ohio. I. Soil physical properties, root distribution and grain yield of corn and soybean. Soil Till. Res., 14:341-355, 1989.

LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.37-51. (Special, 35).

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino

sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.1065- 1072, 2008.

LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. In: Stewart. B.A (ed.). Adv.Soil ci. New York, Spring Verlag, 1985, p-277-293.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. Estimativa da capacidade de suporte do solo a partir da resistência a penetração. R. Bra. Ci. Solo. 30:217-223. 2006

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction on soil physical properties and crop growth. Geoderma. Amsterdam. v.116, p 107-136, 2003.

LOPES, A.S.; **Solos sob Cerrado:** características, propriedades e manejo. 2. ed. Piracicaba. Potafos. 1984.162 p.

LOPES, A. S. Recomendações de calagem e adubação no sistema de plantio direto. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Orgs.).**Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais:** 5a aproximação. Viçosa: UFV/EPAMIG, 1999. 359 p.

MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A.; BERNARDI, A.C.C. et al. Variabilidade de atributos de fertilidade e espacialização da recomendação de adubação e calagem para a soja. In: MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A.; BERNARDI, A.C.C. (Eds.) **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p.115-129.

MARCOLAN, A. L.; ANGHIONONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, p.163-170, 2006.

MENDES, F.G.; MELLONI, E.G. MELLONI, R.; Aplicação de atributos físicos do solo no estudo de áreas impactadas em Itujubá/MG. Cerne. Lavras. v.12, n.3, p.211-220, jul/set 2006.

MENEGATTI, L.A.A. Metodologia para identificação, caracterização e remoção dos erros em mapas de produtividade, Piracicaba, 2003, 84p.

Dissertação (Mestrado) -"Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz".
Universidade de São Paulo.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**.
Lavras: UFLA, 2002. 626 p.

MONTOVANI, E. C. A Agricultura de precisão e sua organização no Brasil. In:
BORÉM, A; QUEIROZ, D. M.; MONTAVANI, E, C.; (Org). Agricultura de
Precisão. Viçosa, MG: 2000, v.1. p.77-92.

MORAES, W.V. Comportamento de características e propriedades físicas de
um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivos.
Lavras, ESAL, 1984. 107p. (Tese de Mestrado).

MÜLLER, C. 2003. Expansion and modernization of agriculture in the Cerrado
– the case of soybeans in Brazil's center-West. Department of Economics
Working Paper 306, Universidade de Brasília, Brasília, DF

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic
matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KENNEY, D.R., eds. Methods of soil
analysis: chemical and microbiological properties. Part 2. Madison, American
Society of Agronomy, 1986. p. 539-579.

NOGARA, F.N; ROLOFF, G; MOTTA, A.C.V; Atributos de solo e cultura
especialmente distribuídos relacionados ao rendimento de milho. **Revista
Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.03.Viçosa, mai/jun 2011. p.1025-1033

NOGUEIRA, A DE.; CRECO, C, C.; RODRIGUES, S.; NOGUEIRA, F.;
FURTADO, A.L.S. Geoestatística aplicada aos atributos físicos e químicos do
solo relacionados com a produção da cultura da soja. 5^o CIIC, Campinas,
2011.

OLIVEIRA, E.F. de; BAIRRÃO, J.F.M.; CARRARO, I.M., Efeito dos sistemas
de preparo do solo sobre algumas características físicas e rendimentos de
grãos de soja e milho. In: ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO
ESTADO DO PARANÁ. Resultados da pesquisa na safra de verão 1987/88.
Cascavel: OCEPAR, 1989. p.233-237

OLIVEIRA, E.L. & PAVAN, M.A. Redução da acidez do solo pelo uso de calcário e gesso e resposta da soja cultivada em plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, Petrolina, 1994. Anais. Petrolina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ EMBRAPA-CPATSA, 1993. p.178.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M. A.; Manejo da acidez do solo. Instituto Agronômico do Paraná. 1997. 86 p.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 329 – 335, 2001.

PAZ-GONZALEZ, A, TABOADA MTC, VIEIRA, S. R. (2001). Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. *Canadian Journal of Soil Science*, 81:469-479.

PEDROTTI, A PAULETTO, E.A.; CRESTATABA, A.; FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A.L.; Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa-MG., V.25., n.03, p. 521-529, 2001

PEDROTTI, A. & MELLO JR, A.V. A compactação do solo e sua influência na sustentabilidade dos agrossistemas. Ed. da UFS. São Cristóvão. 2009.62 p.

PROCHNOW, L.I.; Soil acidity evaluation and manegament. *Better crops*. 24. V.98. 2014.n.01.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.181-188.

RAIJ, B. van.; PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.36, n.4, p.587-593, 1972

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343p

RAIJ, B. V. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba: POTAFOS, 1999. 142p.

REATTO, A.; CORREIA, J.R; SPERA, S.T. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDE, S.P. (ed). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina/DF; Embrapa-CPAC, 1998. P.47-86.

REATTO, A.; CARVALHO, A. M. Cerrado: adubação verde. Planaltina/DF: Embrapa Cerrados, 2006. 396 p.

REICHARDT K.; VIEIRA S.; R & LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 10:1-6.1986

RESENDE, M.; CURTI, N.; RESENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa, MG, NEPUT, 1995. 304p.

RESENDE, A.V.; SHIRATSUCHI, L.S.; SENA, M.C.; KRAHL, L.L.; OLIVEIRA, J.V.F.; CORRÊA, R.F.; ORO, T. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. 2. São Pedro – SP, 2006. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Propriedades físicas dos solos em sistemas plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R; PETRY, M. T.; ROSA, G.M.; CERETTA, C.A.; orgs. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, Palloti, 2001. v.1, p.114-133.

RESCK, D.V.S.; VASCONCELLOS, C.A.; VILELA, L. & MACEDO, M.C.M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pasture land on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M. & STEWART, B.A.

Global climate change and tropical ecosystems. Boca Raton, CRC Press, 2000. p.169-196.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. & CORREIA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisol. *Agron. J.*, 72:40-44, 1980.

ROBERTSON, G.P. GS+: Geostatistics for the environmental sciences. Michigan, Gamma Desing Software, 1998. 151p.

ROSA Jr., E.J. Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos de Ponta Porã. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 89p. (Tese de Mestrado).

ROSSATO, R.R. Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 106p. (Tese de Mestrado).

RUSSEL, R.S. & GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots the mechanical impedance. **Netherland Journal Agricultural Science**, 22:305-318,1974.

SALVADOR, N.; REZENDE, P.M.; TOURINO, M.C.; Espaçamento, densidade e uniformidade da semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. v.37, n.8, p.1071-1072, 2002.

SANTI, L.A; AMADO T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N; PIRES, J. L; FLORA, L.P; BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos de solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47. n.9, p 1346-1357, setembro 2012.

SÁ, J.C M.; SANTOS, J.B; CARDOSO, E.G.; SIUTA JUNIOR, D.; Gestão da matéria orgânica do solo, produção sustentável e o sequestro de carbono. In: Reunião de manejo e conservação do Solo e de Água. Se. Aracaju, 2006, SBCS, 2006.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H. Manual de descrição e coleta de solos no campo. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SEGUY, L.; BOUZINAC, S. R. P.; PACHECO, A. **Perspectiva de fixação da agricultura na região Centro-Norte do Mato Grosso**. Mato Grosso: EMPA-MT/EMBRAPA, CNPAF/CIRAD-IRAT, 1989. 52p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO/COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10 e.d. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 416 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v.52, p. 591-611, 1965.

SILVA, S. de A.; LIMA, J.S. de S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho - Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.15-22, 2003.

SILVA, J.W.; GUIMARÃES, E.C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na Estação Climatológica de Uberaba – MG. **Ciência Agrotecnologia**, v. 27, n.3, p. 665-674, 2003.

SILVA, C. A.; BERNARDI, A.C.; MACHADO, P. L. O. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. Embrapa Solos, RJ. 2004.

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

SOUZA, W.J.O.; MELLO, W.J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **R. Bras. Ci. Solo**, 27: 1113-1122, 2003

SOUZA, D.M & LOBATTO, E., eds. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004

SOUZA, D.M.G. de; REIN, T.A. **Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no Cerrado**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 126, p 1-7, jun. 2004.

SOUZA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, T.A. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo para a Região do Cerrado. In: Reunião Brasileira de Fertilidade de Solo e Nutrição de Plantas, 27, 2006, Bonito, MS.

SHIRATSUCHI, L.S.; MARCHÃO, R.L.; JERKE, C.; RESENDE, A.V.; FONTES, J.R.A.; OLIVEIRA, C.M. de; VILELA, M. de F.; SÁ, M.A.C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D.G. dos; HURTADO, S.M.C. **Geração de mapas multitemáticos em agricultura de precisão**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 181,21 p.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.675-688, 2008a.

SFREDO, G. J. Soja no Brasil: Calagem, Adubação e Nutrição Mineral. Emp. Bras. de Pesq. Agrop. Embrapa Soja. Doc 30, Londrina, 2008.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J. & BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.167-190.

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. & BULISANI, E.A. Deficiência de manganês em soja induzida por excesso de calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.27, n.2, p.247-250, 1992.

THOMAS A. L.; COSTA, J.A.; Soja: Manejo para altas produtividades. Evangraf. 248 p. 2010

TORMENA, C.A; SILVA, A.P da; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v22, p.573-581,1998

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

VIANA, J. H. M., In: Distribuição Espacial de Atributos Físico-Químicos, Mineralógicos e Micromorfológicos de Latossolos, visando o Mapeamento de áreas Produtivas. Viçosa, UFV, Tese de Doutorado. 2005, 194p

VOLK, L. B. S.; CASTRO, L.G.; COGO, N. P. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva em solo com cessamento de cultivo, na ausência e na presença de cobertura por resíduo cultural, e sua relação com a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa-MG, v. 30, n.2, p. 339-352, 2006.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Application of soil physics*. New York: Academic Press, 1980.

WATANABE, R.T.; FIORETTO, R.A.; FONSECA, I.B. da; SEIFERT, A.L.; SANTIAGO, D.C.; CRESTE, J.E.; HARADA, A.; CUCOLOTTO, M. Produtividade da cultura de soja em função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, p.477-48

WILLIAMS, S.M.& WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society American Journal**, 68:1403-1409, 2004.

WOORHEES e LINDSTRIM, 1993; SIDIRAS et al., 1984; VIEIRA, 1985; KLEIN e BOLLER, 1995. Soil compaction on conservation tillage in the northern corn belt. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 38, p.307-11, 1983.