



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE
SOJA NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS-PA**

BRENO LIMA COLONNELLI
Engenheiro Agrônomo

BELÉM – PA

2013



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE
SOJA NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS-PA**

BRENO LIMA COLONNELLI
Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de Concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias

BELÉM – PA

2013

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE
SOJA NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS-PA

BRENO LIMA COLONELLI
Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Curso de
Mestrado em Agronomia, área de Concentração Produção
Vegetal, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia.

Aprovada em _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias
Universidade Federal Rural da Amazônia
(Orientador)

Prof. Dr. Joaquim Alves de Lima Junior, 1º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof. Dr. Gustavo Antônio Ruffeil Alves, 2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof. Dr. Luís de Souza Freitas, 3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Aos meus pais MARIA DE NAZARE BRANDÃO DE LIMA E ALBERTO BARBA COLONNELLI, meus tios SUELI LIMA RAMOS DE AZEVEDO e HELÍO RAMOS AZEVEDO (*in memorian*), NEIDE SUELI LIMA FONSECA e JOAQUIM LUIZ FONSECA, pelo esforço material e espiritual dedicado sem o qual não desfrutaria desse momento de realização acadêmica e profissional.

A minha irmã SUENE LIMA COLONNELLI, meu primo HÉLIO LIMA AZEVEDO, com muito carinho e amor.

À minha esposa DANIELE URSULA COSTA VALENTIM e as minhas filhas CAROLINE VALENTIM COLONNELLI e BRENDA VALENTIM COLONNELLI, razões da minha vida.

Aos meus amigos.

MENSAGEM DO AUTOR

Dizem que é na dificuldade que se cresce, mas considerar que só ela o faz, seria o mesmo que dizer que a família, amor, conhecimento, esforço e outras coisas boas não contribuem para o que somos e vamos ser, no entanto as dificuldades com certeza valorizam esse momentos, então as dificuldades são apenas obstáculos que nos fazem saltar mais alto. Por isso que dedico esse trabalho a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram a vencer esse desafio.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, Todo Poderoso, que até aqui me ajudou e me deu bênçãos sem medida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, pela oportunidade e apoio;

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias pela orientação, apoio e pelo conhecimento passado;

À Professora da UFRA, Dra. Herdjânia Veras de Lima, pelo apoio, incentivo e sugestões para o trabalho.

Ao Professor da UFRA, Dr. Gustavo Antônio Ruffeil Alves, pelo apoio, incentivo e sugestões para o trabalho.

Ao Professor da UFRA, Dr. Joaquim Alves de Lima Junior, pelo apoio, incentivo e sugestões para o trabalho.

Ao Professor da UFRA, Dr. Luis de Souza Freitas, pelo apoio, incentivo e sugestões para o trabalho.

À Coordenadoria de Pós-Graduação do Curso de Mestrado em Agronomia e a secretária Gracy Monteiro pelo apoio prestado durante o curso;

À Empresa Juparanã por disponibilizar a área do experimento e por todo apoio na execução do trabalho;

Aos colegas de mestrado da turma de 2011 e 2012 pelo companheirismo e incentivo durante o curso;

A todos os funcionários da UFRA, que sempre estiveram dispostos a me ajudar;

Aos membros da banca examinadora pela contribuição para a finalização deste trabalho;

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
RESUMO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
ABSTRACT	10
1 – INTRODUÇÃO.....	11
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 Agricultura de Precisão (AP)	13
2.2 MAPAS DE RENDIMENTOS	175
2.3 A CULTURA DA SOJA	19
2.4 CLASSIFICAÇÃO BOTANICA	19
2.5 FERTILIDADE DO SOLO	219
2.6 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	25
2.7 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	26
2.8 GEOESTATISTICA	25
2.9 VARIABILIDADE ESPACIAL	26
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 <i>Localização da área</i>	29
3.2 <i>Georreferenciamento da área</i>	31
3.3 <i>Descrição da área de cultivo</i>	31
3.4 <i>Amostragem dos atributos físicos e químicos do solo</i>	32
3.5 <i>Amostragem para determinação da produtividade</i>	35
3.6 <i>Estatística descritiva</i>	35
3.7 <i>Geoestatística dos dados</i>	35
3.7.1 - <i>Análise Variográfica: O Semivariograma Experimental</i>	35
3.7.1.1 - <i>A Equação de Cálculo</i>	36
3.7.2 - <i>Os Modelos</i>	37
3.7.2.1 - <i>Modelos com Patamar</i>	37
3.7.2.1.1 - <i>Modelo Esférico</i>	38
3.7.2.1.2. <i>Modelo Exponencial</i>	38
3.7.2.1.3. <i>Modelo Gaussiano</i>	39
3.7.2.1.4. <i>Modelo Aleatório (Efeito Pepita Puro)</i>	39
3.7.3. <i>Estimação: O Preditor de Krigagem</i>	39
3.7.3.1 - <i>As Condições Requeridas</i>	40
3.7 - <i>Programas Utilizados nas Análises</i>	40
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5- CONCLUSÕES	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem do município de Paragominas com localização no estado do Pará	29
Figura 2. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Juparanã, Paragominas-PA (Maio de 20012). (a) Vista geral da plantação mostrando a declividade e (b) Linhas de plantio com cobertura (palhada).....	30
Figura 3. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Juparanã, Paragominas-PA (Maio de 20012). (a) Vista geral da plantação mostrando a declividade e (b) Linhas de plantio com cobertura (palhada).	31
Figura 4. Mapa de localização dos locais de amostragem (latitude e longitude) do talhão 10, mostrando o esquema de pontos (●) de localização das amostras para análises físicas, químicas, de relevo e produtividade.	32
Figura 5. (a) coleta da amostra indeformada; (b) amostra indeformada embalada e identificada para análise; (c) coleta da amostra deformada; (d) amostra deformada embalada e identificada para análise.	33
Figura 6. (a) coleta de plantas para análise de produtividade dentro do quadrado de 1m ² ; (b) amostra sendo guardada em saco de papel; (c) saco com a amostra sendo colocada em saco plástico para garantir que não ajam perdas.....	34
Figura 7. Esquema do semivariograma experimental (adaptado de Gerra, 1988).....	35
Figura 8. Semivariograma com Patamar (adaptado de Rendu, 1978).....	37
Figura 9. Produtividade média e potencial da soja, em sistema de plantio direto, em Paragominas-PA.	44
Figura 10. Variabilidade espacial da declividade (a), produtividade da soja sob plantio direto em Paragominas-PA (maio de 2012)	46
Figura 11. Semivariograma da produtividade, densidade do solo (DS), resistência a penetração (RP), capacidade de campo (CC), pH H ₂ O, pH KCl, carbono orgânico (C org), matéria orgânica (M.O.)	48
Figura 12. Semivariograma do fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), e acidez potencial (H + Al).....	49
Figura 13. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a) e da umidade na capacidade de campo (b)	52
Figura 14. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), acidez potencial (b) e pH em água (c).....	53
Figura 15. Mapas da distribuição espacial da produtividade, matéria orgânica (M.O.) e carbono orgânico (C org.).....	54
Figura 16. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), potássio (b) e fósforo (c)	56
Figura 17. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), magnésio (b) e cálcio (c)	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva das análises físicas, químicas e da produtividade de soja sob plantio direto em Paragominas - PA (maio de 2012).....	42
Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas das variáveis estudadas, ajustados aos modelos ..	47

Resumo

Com o objetivo de avaliar o potencial de produtividade e a variabilidade espacial de atributos do solo em plantio direto de soja no município de Paragominas no estado do Pará, foi conduzido estudo na Fazenda Juparanã, em uma área de 50 ha, dentro dessa área determinou-se 150 pontos georreferenciados onde em cada ponto coletou-se amostras deformadas de solo na camada de 0,0 – 0,20 de profundidade e com o cilindros de aço amostras indeformadas, dessas amostras foram analisadas as variáveis químicas: pH em água e KC1, P, K, Ca, Mg, Al e físicas: resistência à penetração, densidade do solo, umidade na capacidade de campo e textura. Em cada ponto selecionado foram colhidas manualmente todas as plantas de soja na área de 1m x 1m dentro do ponto e posteriormente debulhada, limpa, seca e pesada para determinação da produtividade. Os dados foram analisados usando semivariogramas e interpolação por krigagem para construção de mapas. As variáveis estudadas ajustaram-se aos modelos exponencial, esférico, linear e gaussiano. Concluiu-se que foi possível determinar as áreas com alta e baixa variabilidade e sugerir estabelecimento de subáreas homogêneas, com a finalidade de tornar o manejo dos recursos mais eficiente.

Palavras-chave: soja, agricultura de precisão, variabilidade espacial, atributos do solo, plantio direto.

¹- Mestrando do PPG em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Orientador: Paulo Roberto da Silva Farias. Professor Dr. da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Abstract

Com o objetivo de avaliar o potencial de produtividade e a variabilidade espacial de atributos do solo em plantio direto de soja no município de Paragominas no estado do Pará, foi conduzido estudo na Fazenda Juparanã, em uma área de 50 ha, dentro dessa área determinou-se 150 pontos georreferenciados onde em cada ponto coletou-se amostras deformadas de solo na camada de 0,0 – 0,20 de profundidade e com o cilindros de aço amostras indeformadas, dessas amostras foram analisadas as variáveis químicas: pH em água e KCl, P, K, Ca, Mg, Al e físicas: resistência à penetração, densidade do solo, umidade na capacidade de campo e textura. Em cada ponto selecionado foram colhidas manualmente todas as plantas de soja na área de 1m x 1m dentro do ponto e posteriormente debulhada, limpa, seca e pesada para determinação da produtividade. Os dados foram analisados usando semivariogramas e interpolação por krigagem para construção de mapas. As variáveis estudadas ajustaram-se aos modelos exponencial, esférico, linear e gaussiano. Concluiu-se que foi possível determinar as áreas com alta e baixa variabilidade e sugerir estabelecimento de subáreas homogêneas, com a finalidade de tornar o manejo dos recursos mais eficiente.

Palavras-chave: soja, agricultura de precisão, variabilidade espacial, atributos do solo, plantio direto.

1 – INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro é sem dúvida uma das atividades mais importantes para a economia nacional, e com grande importância na produção de alimentos mundial, fazendo com que o Brasil seja reconhecido internacionalmente como um país agrícola, isso se evidencia quando analisamos o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, onde entorno de um terço do total é gerado pela produção agrícola. E segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola de janeiro de 2013 estima a produção de Soja em torno de 83 toneladas de grãos o que faria o Brasil subir do segundo lugar atrás dos Estados Unidos para o primeiro.

A produção de Soja brasileira já esta consolidada, e com a vantagem de ainda ter um grande potencial de crescimento não só em área, mas também em produtividade, e umas das ferramentas que deve ajudar esse crescimento é a agricultura de Precisão (AP).

No Brasil, a soja é a cultura com a maior área cultivada. De acordo com o levantamento sistemático da produção agrícola do IBGE de abril de 2013, para safra 2012/2013, a cultura ocupou uma área de 27,56 milhões de hectares, com produção total de 80,99 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 2.937 kg ha⁻¹. No Pará, a soja (em grão) possui uma área plantada de 189,03 mil ha, produção de 511,05 mil toneladas e rendimento médio de 3.077 kg ha⁻¹.

O solo tem sofrido modificações em sua fertilidade devido as praticas de manejo empregadas que priorizam a aplicação uniforme de insumos, onde as recomendações de adubações partem de uma análise feita por amostra composta de uma área grande, subestimando as diferenças de nutrientes dessa área.

Segundo Raij (1991) solos férteis permitiram o desenvolvimento de civilizações e a criação de riquezas em inúmeras regiões do mundo. Ainda hoje isso ocorre, enquanto ainda há terras férteis virgens a serem conquistadas. A pesquisa científica e tecnológica orientou o caminho para que uma agricultura, baseada em grande parte no uso de corretivos da acidez e de fertilidade minerais, passasse a ocupar áreas antes improdutivas. Ao mesmo tempo, solos desgastados puderam ter sua produtividade restaurada.

A obtenção de informações a respeito da variabilidade espacial das propriedades do solo e das plantas é de grande importância para a avaliação da

fertilidade; levantamento, mapeamento e classificação de solos; desenvolvimento de esquemas mais adequados de amostragens, entre outros, visando à melhoria das condições de manejo e o incremento de produtividade das culturas(SOUZA, 1992).

As dosagens convencionais de fertilizantes atualmente realizadas pelos agricultores implicam em aplicações excessivas em determinadas áreas do campo e insuficientes em outras. O conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode otimizar as aplicações localizadas de corretivos e fertilidades, melhorando, dessa maneira, o controle do sistema de produção das culturas, reduzindo os custos gerados pelo uso de insumos e a degradação ambiental provocado pelo excesso desses nutrientes (ROCHA 1998).

A partir dos avanços tecnológicos na agropecuária, especialistas têm notado, cada vez mais, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Neste sentido, a variação espacial e temporal deve ser considerada para melhor aplicação e aproveitamento dos insumos químicos, podendo assim aumentar a produtividade, reduzir o custo de produção e o impacto ambiental causado pelo excesso de produtos químicos utilizados (FARIAS et al., 2003).

Sobre a necessidade de uma melhor e mais racional utilização do solo, visando sua conservação, se torna necessário aumentar a eficiência na utilização dos insumos agrícolas, no sentido de reduzir os impactos ambientais, desperdícios e o aumento desnecessário nos custos de produção, para esse objetivo foi desenvolvida uma ferramenta de grande potencialidade a agricultura de precisão. Isso permite que o agricultor obtenha informações mais precisas sobre sua área possibilitando uma melhor gestão de seus recursos como o solo, os insumos, a água.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de produtividade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em plantio direto de soja no município de Paragominas-PA utilizando técnicas de agricultura de precisão e geoestatística.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Agricultura de Precisão (AP)

A agricultura de precisão está sendo utilizada cada vez mais por agricultores do Brasil e do mundo, norteados muitos produtores no meio rural, funcionando como uma ferramenta para uma maior eficiência na administração da propriedade. No sistema de AP, busca-se aperfeiçoar a aplicação dos recursos na produção de acordo com a variação existente entre os talhões. Além disso, nesse sistema, os resultados são apresentados de acordo com a variabilidade das lavouras na forma de mapas e não mais somente pelo sistema de médias, ainda muito praticado no país, que não leva em consideração a variabilidade existente nos talhões, onde se aplica os insumos de maneira generalizada com bases em médias.

A agricultura de precisão propõe que o tratamento localizado dos pontos do terreno pode maximizar o uso da terra e de insumos agrícolas, aumentando a produtividade e diminuindo o gasto com insumos. Tal prática diminui a toxidez causada pelo excesso de algumas substâncias que são empregadas na produção agrícola, reduzindo assim a pressão sobre o meio ambiente (ARAÚJO et al., 2004).

Segundo Brusco et al. (2005), a agricultura de precisão visa uma forma de manejo sustentável, na qual as mudanças ocorrem sem prejuízos para as reservas naturais, ao mesmo tempo em que os danos são minimizados.

A Agricultura de Precisão, de acordo com Sulzbach (2003), pode ser definida como um ciclo de atividades e tomada de decisões no sistema produtivo, podendo ser dividido em três etapas: (1) Colheita e geração de mapas de produtividade; (2) Análise e avaliação do mapa de produtividade e (3) Geração e execução de mapas de aplicação variável para as seguintes atividades: preparo do solo; plantio; fertilização do solo e pulverização.

Segundo Manzatto et al. (1999) o conceito de Agricultura de Precisão é aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos permitirem.

Davis (1998) afirma que a agricultura de precisão foi frequentemente definida com base nas tecnologias que permitem que ela seja realizada com GPS (Sistema de Posicionamento Global) e sistemas de taxa variável. Tão importantes quanto os dispositivos usados na agricultura de precisão, é perceber que a informação usada ou coletada é o ingrediente chave para o sucesso do sistema. O conceito de agricultura de precisão se distingue da agricultura tradicional por seu

nível de manejo. Em vez de administrar uma área inteira como única unidade, o manejo é adaptado para pequenas áreas dentro de um campo.

Pires et al. (2004) sugere alguns benefícios da AP, melhor controle da área de cultivo mediante o conhecimento da variação do rendimento de grãos de local para local; uso racional de insumos, para maior retorno; menor impacto ambiental e melhoria da qualidade do solo ao longo do tempo; priorização dos investimentos em insumos nas áreas em que o potencial de rendimento de grãos é maior, garantindo maior possibilidade de retorno econômico com menor investimento (salienta-se que o retorno econômico obtido dependerá da variabilidade da área trabalhada e da importância econômica da cultura); maior fluxo de informações para direcionar a tomada de decisões de manejo; e vi) valorização da propriedade rural.

Conforme Focht et al. (2004), a AP consiste de um conjunto de técnicas que envolvem máquinas e equipamentos, softwares e pessoal especializado, com objetivo de prover uma ferramenta mais apurada no referente ao gerenciamento agrícola. Esses autores também informam que, atualmente, no Brasil, a referida agricultura foge ao contexto do manejo em sítio específico, muito abordado por 31 diversos autores, na década de 90. É vista, atualmente, como um sistema mais amplo em que as variáveis não condizem apenas à produção, mas também são questionadas em relação a fatores ambientais e agronômicos.

Para Silva et al. (2000) a exploração com base em Sistemas de Produção pressupõem que a maximização da rentabilidade e da qualidade do sistema é promovida pela otimização de cada etapa do processo produtivo das culturas que o compõem. E é considerada a base estratégica fundamental para integração da produção agrícola, através da AP. Nestas condições, agrega-se ao produto uma vantagem competitiva que nem sempre lhe é conferida pela agricultura convencional quando apenas reduz-se custo ou busca-se a elevação da produtividade, como forma de maximizar a renda líquida das explorações.

De acordo com a Arvus (2007), a AP tende a criar uma situação virtuosa na agricultura pela redução no uso de agrotóxicos e insumos. Isso melhora a conservação dos solos cultivados, limitando a degradação do meio ambiente. Assim, quanto mais áreas utilizarem estas técnicas, menor será a degradação ambiental preservando a produtividade. Toda intervenção no processo produtivo implica em alterações nos custos e nos benefícios. Isso torna importante a realização de avaliações na magnitude destas mudanças, com vistas a subsidiar o processo de decisão.

A importância da agricultura de precisão tem sido muito reconhecida como um contribuinte chave na tecnologia da produção de colheita mundial, mas até agora, esta tecnologia está tornando-se somente praticável em grandes fazendas (WAHEED et al., 2006).

O crescimento das plantas, conforme a lei do mínimo, citada por Rajj (1991), é limitado pelo nutriente menos disponível no solo. Os aumentos sucessivos nas quantidades disponíveis no solo, em função de utilização de quantidades crescentes de fertilizantes, também podem atingir níveis prejudiciais ao crescimento das plantas. Esse é o princípio da lei dos incrementos decrescentes. Por isso, a AP é uma nova maneira de produção agrícola muito indicada para grandes áreas de lavoura. Proporciona meios de tratar cada setor da plantação de forma diferenciada, garantindo o tratamento necessário e suficiente de insumos ou defensivos, utilizando, para isso, a aplicação localizada destes.

2.2 Mapas de Rendimento

O conhecimento adquirido com as informações fornecidas pela agricultura de precisão permite aos produtores melhor suporte na tomada de decisões, resultando em potenciais benefícios ambientais, economia de insumos e lucros (MOLIN et al., 2006).

A correta interpretação de dados referentes à variabilidade espacial das lavouras é a etapa mais trabalhosa e mais importante do processo de implantação da AP, sempre visando à busca dos responsáveis pela variabilidade e objetivando a sua intervenção quando viável ou a convivência quando esses fatores não permitem intervenção prática e econômica (MOLIN, 2000)

Muitos dos trabalhos que vem sendo executados na área de agricultura de precisão tem por base o levantamento das hipóteses a serem avaliadas a partir dos mapas de produtividade.

Segundo Molin (2002), muitos pesquisadores consideram que o mapa de colheita é o meio de informações mais completo para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras. Entretanto é necessário que se faça um tratamento preliminar dos dados antes de transformá-los em mapas, pois estes irão servir para análise e tomada de decisão.

Mapa de produtividade é a representação gráfica da quantidade do produto agrícola colhida a cada ponto georreferenciado da lavoura, possuindo como objetivo a determinação da variabilidade espacial da produção (SULZBACH (2003),

Colaço et al. (2008) testaram a validade do método de mapas de produtividade evidenciando a sua capacidade em revelar manchas de produtividade relacionadas à ocorrência de doenças como declínio dos citros e HLB (Huanglongbing, ou ex-greening). Shueller et al. (1999) realizaram mapas de maneira similar, georeferenciando no campo os contêineres

utilizados na colheita manual em um pomar comercial na Florida. Os autores alegam o baixo custo da geração dos mapas e confiabilidade das informações.

O mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra (CAPELLI, 2004).

A interpretação do mapa de produtividade é imprescindível para a correção dos fatores de produção que persistem ao longo do tempo, tais como: variação do tipo de solo na área plantada e outros como acidez do solo em locais específicos, deficiência de fertilizantes, ou mesmo, formulação inadequada de N-P-K e locais com falta ou excesso de água (CAPELLI, 2004).

Capelli (2004), disse que o mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra.

A geração e a interpretação de mapas de produtividade de culturas agrícolas é um dos segmentos da Agricultura de Precisão, que tem recebido especial atenção de pesquisadores e de fabricantes de máquinas agrícolas, em face de sua importância no contexto do entendimento do processo da variabilidade espacial da produção agrícola e na definição de ações de manejo agrônômico, que visam o aumento e manutenção sustentada dos índices de produtividade de uma lavoura agrícola.

A pesquisa em relação aos mapas de produtividade desenvolve-se na atualidade, principalmente com dois focos: O foco relativo à indústria/mecanização, com estudos de sensores de rendimento e demais instrumentação compatível, que são instalados em colheitadeiras que também são equipadas com sistema de geoposicionamento (GPS). O outro foco é o agrônômico que concentra estudos, de impacto da tecnologia, na gestão da lavoura, com os objetivos de caracterizar e definir a importância e metodologia de aplicação e análise destes mapas de rendimento (GIOTTO et al., 2006).

Desta maneira, mapas de produtividade podem ser utilizados na investigação das causas da variabilidade, e podem ser um recurso eficaz nas decisões sobre o manejo do solo (MOLIN, 1997).

Um mapa de produtividade evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas não explica a causa de tal variação, que pode ser por doenças, baixo pH, estresse hídrico e outras; se a causa específica não é determinada, nenhuma resposta ao gerenciamento pode ser obtida (LARK e STAFFORD, 1997).

O mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra (CAPELLI, 2004).

Molin (2002) reforça que essa informação é o ponto de partida tido por usuários e pesquisadores para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras, por materializar a resposta da cultura.

No começo da década de 90, começaram a ser desenvolvidas tecnologias e princípios para manejar as variabilidades espacial e temporal associadas com os aspectos da produção agrícola. A produtividade das culturas varia espacialmente, e determinar as causas dessas variações é o desafio que enfrenta a Agricultura de Precisão. As variações espaciais podem ser estudadas a partir de técnicas geoestatísticas que permitem elaborar mapas e delimitar áreas de manejo diferenciadas (FARIAS et al., 2003).

2.3 A Cultura da Soja

Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) planta pertencente à família Leguminosae, com grande importância econômica mundial. A planta tem como centro de origem a região da China Antiga, no continente asiático, constituindo-se na base alimentar do povo chinês há mais de cinco mil anos (CÂMARA, 1998).

De acordo com Hartwig e Kiihl, 1979, a soja é provavelmente nativa do vale do rio Amarelo, na Região Norte da China. Evidências históricas indicam que a domesticação ocorreu no século XI A.C. O cultivo expandiu-se vagarosamente por algumas regiões da Ásia, apenas chegando ao Ocidente no final do século XV, onde permaneceu como simples curiosidade botânica pelos quatro séculos seguintes. Originou-se a uma latitude de aproximadamente 40° N, com um clima continental caracterizado por invernos frios e verões quentes e secos.

No Brasil data de 1914, o primeiro registro de plantio de soja, foi no município de Santa Rosa, RS. Mas foi somente a partir dos anos 40 que ela adquiriu alguma importância econômica, merecendo o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola

do RS (área cultivada de 640 ha, produção de 450 t e rendimento de 700 kg/ha). Nesse mesmo ano instalou-se em Santa Rosa, RS, a primeira indústria processadora de soja do País e, em 1949, com produção de 25.000 t, o Brasil figurou pela primeira vez como produtor de soja nas estatísticas internacionais (EMBRAPA SOJA, 2003).

Durante a década de 1960, o cultivo de soja se concentrava nos três estados da Região Sul do Brasil: Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Atualmente, 60% da produção de soja está concentrada na região Centro-Oeste. A zona sul é caracterizada por pequenos agricultores, principalmente organizados em cooperativas, enquanto que a área central é caracterizada por grandes explorações, com níveis muito elevados de mecanização e, principalmente organizados em grandes grupos privados. Além disso, o clima é mais estável no Brasil Central. A mais recente expansão de soja tem tido lugar na região Norte da Amazônia Legal. A produção de soja na região Norte representa apenas uma pequena fração da área plantada atualmente, mas está se expandindo (SMALING et al., 2008).

Guimarães, (2007), cita que a soja como o principal complexo exportador brasileiro, se confunde com o processo de modernização da agricultura nacional. Pode-se dizer que a expansão da cultura da soja foi uma das principais responsáveis pela introdução do conceito de agronegócio no país, não só pelo volume físico e financeiro envolvido, mas também pela necessidade da visão empresarial da atividade por parte dos produtores, fornecedores de insumos, processadores da matéria-prima e negociantes, de forma a manter as vantagens competitivas de produção.

O Estado do Pará, nos últimos treze anos, vem se constituindo em uma das mais novas áreas de expansão da cultura da soja, sendo constatado um aumento considerável da área plantada, principalmente no nordeste paraense.

Segundo a Embrapa Soja (2006), são indicadas para plantio no Estado do Pará, seis cultivares, BRS Sambaíba, BRS Tracajá, BRS Candeia, BRS Babaçu, BRS Seridó RCH e BRS 219 (Boa Vista), sendo a linhagem BR 97-1665 plenamente adaptada a região e com amplas possibilidades de indicação para plantio. No entanto com a possibilidade de plantio utilizando cultivares transgênicas no Brasil e no estado do Pará, nota-se que o produtor tem optado por essas cultivares, mesmo com poucas pesquisas sobre seu comportamento e adaptação na região.

2.4 Classificação Botânica

A soja pertence à classe das dicotiledôneas, família leguminosa e subfamília Papilionoides. A espécie cultivada é a *Glycine max* Merrill. O sistema radicular é pivotante, com a raiz principal bem desenvolvida e raízes secundárias em grande número, ricas em nódulo de bactérias *Bradyrhizobium japonicum* fixadoras de nitrogênio atmosférico (MISSÃO, 2006).

O caule herbáceo, ereto com porte variável de 0,60 m a 1,50 m, nubescentes de pêlos brancos, parcedaneos ou tostados. É bastante ramificado, com os ramos inferiores mais alongados e todos os ramos formando ângulos variáveis com haste principal.

As folhas são alternadas, longas pecioladas, compostas de três folíolos ovalados ou lanceolados, de comprimento variável entre 0,5 a 12,5 cm. Na maioria das variedades as folhas amarelam à medida que os frutos amadurecem e caem quando as vagens estão maduras.

As flores nascem em racínios curtos, axiliares de terminais, geralmente com 9 a 10 flores cada um, de coloração branca, amarela ou violácea, dependendo da variedade.

Os frutos são vagens achatadas, pubescentes, de cor cinza, amarela palha ou preta, dependendo da variedade. Encerram duas a cinco sementes e nascem, geralmente, em agrupamento de três a cinco, de modo que se pode encontrar até 400 vagens por planta.

As sementes possuem forma arredondada, achatada ou alongada. A coloração é variada (o comércio prefere as sementes amarelas) e o tamanho também é variado.

2.5 Fertilidade do Solo

Devido as praticas de manejo a fertilidade do solo tem se modificado ao longo dos anos, praticas essas que priorizavam a aplicação uniforme de insumos, visando a correções e ao suprimento de nutrientes para culturas de grãos, entre outras. Segundo Rajj (1991), solos férteis permitiram o desenvolvimento de civilizações e a criação de riquezas em inúmeras regiões do mundo. Ainda hoje isso ocorre, enquanto ainda há terras férteis virgens a serem conquistadas. A pesquisa científica e tecnológica orientou o caminho para que uma agricultura, baseada em grande parte no uso de corretivos da acidez e de fertilizantes minerais, passasse a ocupar áreas antes improdutivas. Ao mesmo tempo, solos desgastados puderam ter sua produtividade restaurada. A obtenção de informações a respeito da variabilidade espacial das propriedades do solo e das plantas é de grande importância para a avaliação da fertilidade; levantamento, mapeamento e classificação de solos; desenvolvimento de esquemas mais adequados de

amostragens, entre outros, visando à melhoria das condições de manejo e o incremento de produtividade das culturas (SOUZA, 1992).

As muitas propriedades do solo variam continuamente no espaço e, conseqüentemente, os valores em locais mais próximos entre si tendem a serem próximos daqueles tomados mais distantes entre si, até uma distância limite, correspondente ao domínio dessas propriedades. Caso isso ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes e um tratamento estatístico mais adequado é necessário. As variações nas propriedades do solo correlacionam-se com a posição no espaço, ou seja, dois valores tomados próximos um do outro tendem a ser mais semelhantes entre si que dois tomados mais afastadamente, (Webster; Olivier, 1990).

Segundo Rocha e Lamparelli, (1998), as aplicações convencionais de fertilizantes atualmente realizadas pelos agricultores implicam aplicações excessivas em determinadas áreas do campo e insuficientes em outras. O conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode otimizar as aplicações localizadas de corretivos e fertilizantes, melhorando, dessa maneira, o controle do sistema de produção das culturas, reduzindo os custos gerados pela alta aplicação de insumos e a degradação ambiental provocada pelo excesso desses nutrientes.

Mesmo reconhecendo a possibilidade de detectar e manejar a variabilidade de muitos atributos, como produtividade e qualidade da cultura, tipo de solo e nutrientes, plantas daninhas, pragas e doenças, Dampney e Moore (1999) afirmaram que o mapeamento confiável e não oneroso desses atributos apresenta muitos desafios. Embora mapas confiáveis de produtividade possam ser produzidos, outros atributos mapeados por sistemas comerciais de mapeamento nem sempre oferecem a mesma confiabilidade. A base dos levantamentos desses atributos pode ser inadequada para dar suporte à forma detalhada com que os resultados são apresentados aos produtores rurais. Complementando, Dampney e Moore (1999) afirmaram que, embora a amostragem intensiva possa ser custosa, devem ser reconhecidos os perigos de alguns mapas interpolados, que exibem uma apresentação agradável, mas são potencialmente enganosos, pois foram produzidos a partir de dados insuficientes. O significado de ter informações perdidas em função de amostragem a espaçamentos mais largos, bem como o mérito da amostragem inteligente em predeterminadas zonas do campo, baseada em fatores tais como tipo de solo, topografia e padrões de crescimento e produtividade, são questões relevantes que devem ser analisadas.

Visando a um aproveitamento melhor dos recursos agrícolas, muitos trabalhos sobre manejo localizado de culturas estão sendo desenvolvidos, especialmente em relação à aplicação

localizada de nutrientes no solo. De acordo com Malzer (1996), os métodos da AP podem ser utilizados com qualquer variável agrícola, apesar de sua origem ser o manejo de nutrientes e fertilidade do solo. Como afirmam Tweeten (1996) e Balastreire (1997), o impacto ambiental causado pela distribuição excessiva de fertilizantes é uma das razões para esses estudos, em virtude de problemas de lixiviação dos nutrientes, atingindo o lençol freático, e de carreação pelas chuvas, poluindo rios, córregos e lagos.

Outra razão é o prejuízo econômico causado pela aplicação de fertilizante em excesso em alguns pontos e insuficiente em outros, diminuindo a produção, devido ao método convencional utilizado no cálculo de adubação, em que se realiza apenas uma amostragem representativa para a análise química de uma área, obtendo-se um valor médio de aplicação.

2.6 Atributos Físicos do Solo

Watanabe et al., (2000) disse que a capacidade do solo em prover o sistema radicular de condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas pode ser alterada pelas práticas de manejo. Essas modificações influenciam a produtividade das culturas através das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração (RP) das raízes.

Segundo Tormena et al. (1996), a resistência à penetração é um dos atributos físicos do solo, que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular.

O sistema de manejo do solo é considerado uma das fontes mais importantes de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. A aplicação de técnicas geoestatísticas em estudos de variabilidade espacial de diferentes sistemas de manejo ainda é pouco utilizada (SCHAFFRATH et al., 2008).

Em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado. Na soja, o sistema radicular, em condições normais de cultivo, distribui-se quase totalmente nos primeiros 150 mm do solo (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

De acordo com Dexter (2004) a compactação é uma redução do volume de uma determinada massa de solo. Quando o solo é compactado, o volume de poros é reduzido. No entanto, nem todos os poros são reduzidos similarmente. Os maiores poros são geralmente perdidos ou reduzidos na primeira dimensão e a compactação cessa quando o solo se tornou

forte o suficiente para resistir ao estresse aplicado sem qualquer falha. Esta perda preferencial dos maiores poros tem o efeito de alterar a distribuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, a retenção de água.

Fisicamente estabelecida pela pressão, a resistência à penetração é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma base metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitante à da umidade do solo, uma vez que varia de forma inversamente proporcional. Por outro lado, varia positivamente com a densidade do solo (BENGOUGH et al., 2001).

Em vasos, verificam que na RP de 0,69 Mpa houve a uma redução de 50% no comprimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho-Escuro. Em geral, tem-se adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998).

Beutler et al. (2003), em Latossolo Vermelho distrófico, adotaram o valor de 2,22 MPa como crítico para a produção da soja nesse solo.

Em trabalho realizado por Beutler et al. (2007), em Latossolo Vermelho, textura média, observaram que a produtividade de soja decresceu a partir da resistência do solo à penetração de 2,33 MPa e da densidade de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$.

Em relação a densidade, existe carência de informações que indiquem valores restritivos ao crescimento radicular das plantas. Lima et al. (2007) consideraram um valor médio de densidade de $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$, para um solo Argissolo Vermelho distrófico arênico, de textura superficial franco arenosa como não representante de um fator crítico para o desenvolvimento das plantas.

A textura é de particular importância, uma vez que a interação água - solo depende da composição granulométrica, particularmente da fração argila (GONÇALVES et al., 2001).

O método do densímetro baseia-se na sedimentação do tamanho das partículas e é determinado com base na medida do seu tempo de queda num líquido. Este método considera a sedimentação de partículas teoricamente esféricas e em regime de fluxo laminar (não-turbulento), conforme sugere a Lei de Stokes, usada para calcular a velocidade que as partículas em suspensão sedimentam. A partir desta velocidade, é calculado o tempo necessário para que uma partícula do solo de determinado diâmetro seja sedimentada. O material que permanece nessa suspensão aquosa pode ser quantificado a partir de sua densidade e, expresso em massa (ALMEIDA, 2008).

2.7 Atributos Químicos do Solo

Souza et al., (2004) disse que a convencional aplicação de insumos é baseada em teores médios da fertilidade do solo, podendo subestimar ou superestimar esses teores no solo, acarretando excessos ou déficit nutricionais em determinadas áreas. Portanto, o conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode otimizar a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, melhorando, dessa maneira, o controle do sistema de produção das culturas.

O potássio é absorvido na forma iônica (K^+) e assim permanece nas plantas, não formando compostos. É um nutriente muito móvel na planta, mantém o potencial osmótico e participa da abertura e fechamento dos estômatos, regulando a transpiração e entrada do CO_2 e influenciando a fotossíntese. O potássio também é ativador de um grande número de enzimas, e atua no transporte transmembrana (EPSTEIN e BLOOM, 2005).

As plantas podem tolerar relativamente altas concentrações de potássio sem apresentar distúrbios. No entanto, ele pode causar efeitos indiretos pela deficiência induzida de outros nutrientes, como cálcio e magnésio. Altas concentrações de potássio podem, também, inibir a absorção de boro, zinco, manganês e amônio, induzindo, ou ao menos contribuindo para a deficiência destes elementos (BERGMANN, 1992).

O fósforo (P) é o nutriente mais limitante da produtividade de biomassa em solos tropicais (NOVAIS e SMYTH, 1999). Os solos brasileiros são carentes de P, em consequência do material de origem e da forte interação do P com o solo (RAIJ, 1991), em que menos de 0,1% encontra-se em solução (FARDEAU, 1996).

O fósforo é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É também componente estrutural dos ácidos nucléicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. As limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. O suprimento adequado de P é, pois, essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT et al., 2001). O cálcio é absorvido como Ca^{+2} , e é um importante componente da parede celular, sendo imprescindível para o crescimento apical, tanto das raízes como parte aérea. É um elemento imóvel quanto à redistribuição na planta (DEON, 2007).

A aplicação de fertilizantes fosfatados em área total (fosfatagem), no sistema de plantio direto, tem sido realizada em superfície, sem incorporação. Por causa da presença da palhada e

do maior nível de matéria orgânica, este manejo proporciona um ambiente menos oxidativo, fazendo com que as reações de fixação sejam minimizadas e que haja menor contato dos resíduos com o solo, promovendo impacto direto na fertilidade das camadas superficiais, até 10 cm de profundidade (COSTA, 2000).

Segundo Deon, (2007), o magnésio é um nutriente absorvido pelas plantas como cátion divalente (Mg^{2+}). É o elemento central da molécula de clorofila e ativador enzimático. É móvel quanto à redistribuição na planta. O magnésio é outro nutriente presente no calcário, quando este for dolomítico, mas pode ser fornecido às plantas como sulfato de magnésio.

A resistência à penetração é um dos atributos físicos do solo, que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA ET AL., 1996).

O sistema de manejo do solo é considerado uma das fontes mais importantes de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. A aplicação de técnicas geoestatísticas em estudos de variabilidade espacial de diferentes sistemas de manejo ainda é pouco utilizada (SCHAFFRATH et al., 2008).

Em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado. Na soja, o sistema radicular, em condições normais de cultivo, distribui-se quase totalmente nos primeiros 150 mm do solo (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

A compactação é uma redução do volume de uma determinada massa de solo. Quando o solo é compactado, o volume de poros é reduzido. No entanto, nem todos os poros são reduzidos similarmente. Os maiores poros são geralmente perdidos ou reduzidos na primeira dimensão e a compactação cessa quando o solo se tornou forte o suficiente para resistir ao estresse aplicado sem qualquer falha. Esta perda preferencial dos maiores poros tem o efeito de alterar a distribuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, a retenção de água (DEXTER, 2004).

De acordo com Bengough et al., (2001) fisicamente estabelecida pela pressão, a resistência à penetração é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma base metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitante à da umidade do solo, uma vez que varia de forma inversamente proporcional. Por outro lado, varia positivamente com a densidade do solo.

Em trabalho realizado por Beutler et al. (2007), em Latossolo Vermelho, textura média, observaram que a produtividade de soja decresceu a partir da resistência do solo à penetração de 2,33 MPa e da densidade de 1,51 Mg m⁻³.

Tormena et al. (1998) verificou em vasos, verificam que na RP de 0,69 Mpa houve a uma redução de 50% no comprimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho-Escuro. Em geral, tem-se adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicular.

Beutler et al. (2003), em Latossolo Vermelho distrófico, adotaram o valor de 2,22 MPa como crítico para a produção da soja nesse solo.

Em relação a densidade, existe carência de informações que indiquem valores restritivos ao crescimento radicular das plantas. Lima et al. (2007) consideraram um valor médio de densidade de 1,58 Mg m⁻³, para um solo Argissolo Vermelho distrófico arênico, de textura superficial franco arenosa como não representante de um fator crítico para o desenvolvimento das plantas.

A textura é de particular importância, uma vez que a interação água - solo depende da composição granulométrica, particularmente da fração argila (GONÇALVES et al., 2001).

2.8 Geoestatística

Qualquer amostra retirada de algum ponto no espaço ou no tempo devem ser considerada como parte de uma função contínua e que são pontos discretos desta função. Por isto, pode se dizer que todas as amostras são de algum modo, relacionadas com seus vizinhos, mesmo que não se conheça exatamente e matematicamente qual é a expressão para este relacionamento. Nessa condição, pode-se dizer que amostras vizinhas são mais parecidas umas com as outras do que amostras separadas por grandes distâncias. Obviamente isto é totalmente dependente da intensidade de amostragem em relação à escala de trabalho. Geoestatística é a maneira mais correta e contem as ferramentas ideais para se analisar dados que tem este tipo de comportamento, ou seja, cujos vizinhos próximos são mais semelhantes entre si do que aqueles separados por distâncias maiores (VIEIRA, 2000).

Através dos avanços tecnológicos na agropecuária, especialistas têm notado, cada vez mais, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Neste sentido, a variação espacial e temporal deve ser considerada para que se possa ter melhor aplicação e aproveitamento dos insumos, podendo assim melhorar a produtividade, reduzir o custo de produção e o impacto ambiental causado pelo excesso utilizado (FARIAS et al., 2003).

Quando uma propriedade do solo varia espacialmente com alguma organização, expressa pela dependência espacial, é possível aplicar a geoestatística, a exemplo do teor de um nutriente no solo. A avaliação da dependência espacial requer o uso de técnicas iniciadas quando Krige (1951) concluiu que, para haver sentido nas variâncias do fator analisado, há a necessidade de considerar as distâncias entre as amostras, de modo a estimar os valores em pontos localizados em distâncias intermediárias.

Segundo Lamparelli et al. (2001) a geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de determinada área a ser estudada, utilizando como ferramenta básica a interpolação, gerando como produto um mapa da área segundo um atributo com estimativas não viciadas e de mínima variância.

A formação dos solos não é homogênea ao longo do tempo, tampouco no espaço, e muitas vezes suas propriedades não variam ao acaso, mas apresentam dependência espacial ou temporal. Essa dependência pode invalidar o uso de análises estatísticas convencionais em experimentos de campo, especialmente naqueles que utilizam grandes parcelas. Desse modo, é importante o conhecimento do comportamento espacial ou temporal da variável em estudo para se escolher o modelo matemático adequado (BERNER et al., 2007).

Análise geoestatística dos dados consiste em tentativas e erros para a elaboração do melhor modelo de um semivariograma teórico, visando à geração de mapa que represente realmente a situação no campo pelo processo de interpolação.

Segundo Trangmar et al. (1985) havendo a dependência espacial após a análise dos semivariogramas, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados no campo, sem tendência e com variância mínima, por meio do método denominado “krigagem”. A krigagem consiste de uma técnica de interpolação que faz ótima estimação de variáveis regionalizadas utilizando parâmetros dos semivariogramas e os valores das amostragem feitas.

A análise estatística deve ser realizada através das ferramentas da geoestatística, na maior parte dos estudos, envolvendo áreas não homogêneas, pois o uso da estatística clássica, baseada na média e no desvio padrão é contra indicada nos casos que existe dependência espacial.

2.9 Variabilidade Espacial

O estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem grande importância não só na escolha de uma área experimental, locação das unidades experimentais, coleta de amostras

e interpretação de resultados, mas também no levantamento e classificação de solos e nos esquemas de uso racional de fertilizantes. A variação das características do solo está relacionada com fatores de sua formação (SILVA et al., 2003) e com o efeito do manejo do solo (DOBERMANN e GEORGE, 1994).

De acordo com Mulla et al. (1990) a variabilidade espacial dos atributos do solo influencia na eficiência do manejo e no desenvolvimento da cultura. Portanto, o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é um importante passo para que se possa empregar um manejo mais adequado com relação à realização de práticas agrícolas, estratégia de amostragem e planejamento agrícola eficiente (BHATII et al., 1991).

Segundo Gonçalves et al. (2001) uma vez quantificada, a dependência espacial das propriedades do solo pode ser utilizada para a classificação e para o levantamento de solos em uma área, assim como pode ser usada na interpolação entre observações, permitindo o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem. Esta técnica permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima.

Há necessidade de se obter estimativas das propriedades do solo e planejar pesquisas de forma mais econômica, buscando métodos mais racionais e quantitativos para o estudo das variabilidades intrínsecas dos solos. Desse modo, o conhecimento da variabilidade do solo subsidia a tomada de decisão, além de auxiliar em levantamentos e classificação e na elaboração de mapas (WEBSTER, 1985).

Mercante et al. (2003) a variabilidade espacial dos solos não está sendo levada em consideração na produção agrícola. Tendo um maior conhecimento da variabilidade espacial da produtividade, das propriedades físicas do solo, da variabilidade temporal e fazendo-se o uso da agricultura de precisão, pode-se viabilizar uma agricultura moderna, economicamente competitiva e ecologicamente correta.

Em estudo com variabilidade de fósforo na planta e no solo, Camelo et al. (1993) concluíram que a planta atuou como integradora da variabilidade do solo e que a intensidade de amostragem poderia ser menor para o fósforo na planta do que no solo.

Silva et al. (2003) trabalhando com a variabilidade espacial na produtividade de milho, constataram que houve uma distribuição normal, sendo a variável fósforo disponível no solo, a que apresentou maior variação no solo. Os mesmos autores constataram também que a produtividade de grãos e todas as características químicas avaliadas apresentaram dependência espacial forte à moderada, evidenciando a importância da agricultura de precisão.

Barbieri et al. (2002) estudaram a variabilidade espacial de fósforo, potássio e soma de bases em área sob cultivo de cana-de-açúcar. Por meio da geoestatística os semivariogramas ajustaram-se ao modelo exponencial para as variáveis fósforo e potássio, e esférico para a soma de bases, com valores de alcance de 711 m, 743 m, e 587 m para o fósforo, potássio e soma de bases, respectivamente. A partir dessas informações os autores sugerem que em futuras amostragens para avaliação de propriedades de solo em condições semelhantes, utilize-se malha suficiente para cobrir toda a área de interesse, com o intervalo de amostragem igual ao alcance da dependência espacial, o que estaria associando a menor esforço de amostragem, com maior representatividade, além de permitir a interpolação entre pontos amostrais e a elaboração de mapa sobre toda a área. Os resultados indicam que a distância entre pontos de amostragem do solo para se conhecer a variabilidade espacial dos teores de fósforo e potássio, deve ser da ordem de 743 m e para a soma de bases 587 m, respectivamente. Finalmente, concluem que todos os atributos estudados apresentaram grau da dependência espacial moderada.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1- Localização da Área

A área experimental está localizada no município de Paragominas, PA, distante cerca de 330 km da capital, Belém; microrregião do Rio Capim, mesorregião do nordeste paraense (Figura 1), na Fazenda Juparanã, compreende as coordenadas geográficas: -02 53' 10,59752" de latitude Sul e -47 33' 40,27556" de longitude Oeste de Greenwich (sede da fazenda), apresentando solo do tipo Latossolo Amarelo, o relevo local e suave ondulado com declividade em torno de 3,8 %, clima tipo Ami, segundo a classificação de Köppen, com os maiores índices de pluviosidade de janeiro a março e os menores de agosto a novembro.

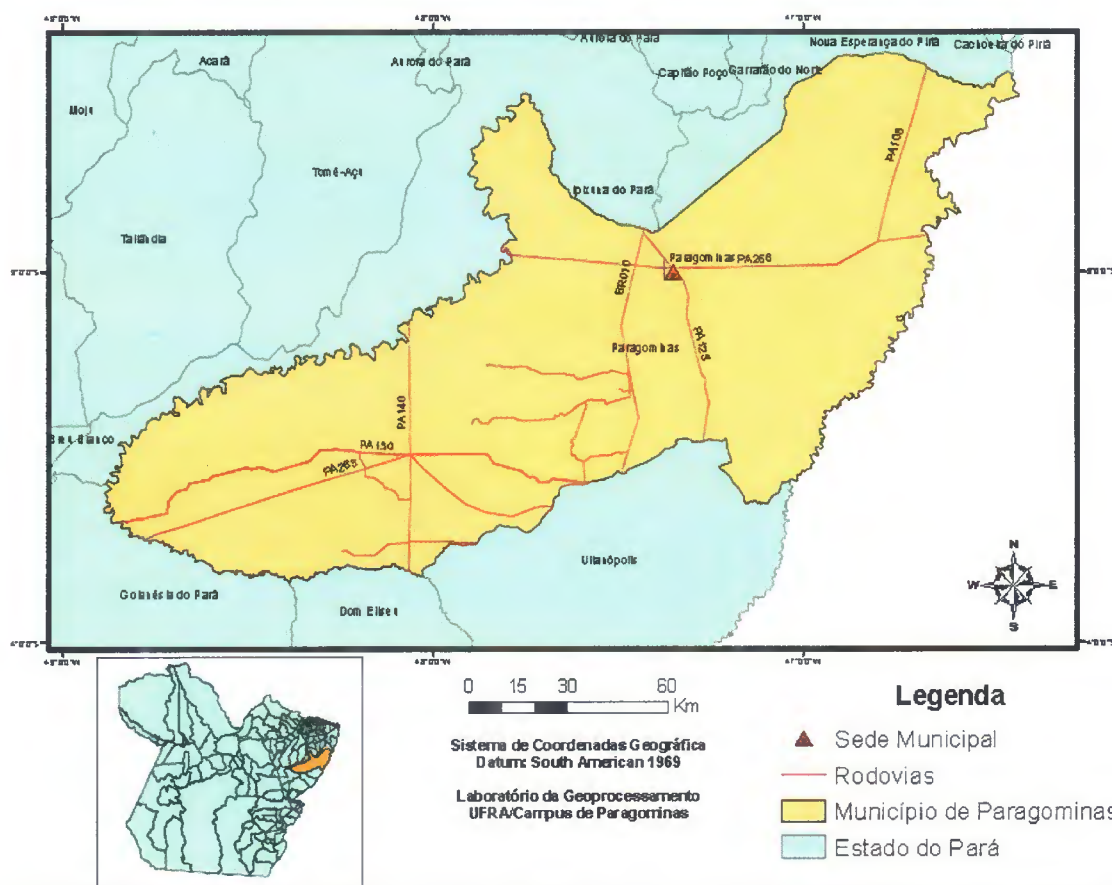


Figura 1. Imagem do município de Paragominas com localização no estado do Pará.

A área possuía uma declividade um pouco acentuada (Figura 2^a) e foi cultivada com plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar BRS Sambaíba. O plantio da soja foi feito em linhas retas sem a utilização de curva de nível (Figura 2 b).



(a)



(b)

Figura 2. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Juparanã, Paragominas-PA (Maio de 2012). (a) Vista geral da plantação mostrando a declividade e (b) Linhas de plantio com cobertura (palhada).

3.2- Georreferenciamento da Área

Para identificação dos locais de amostragem, foi utilizado o receptor GPS V Plus, fabricado pela Garmin, para uso terrestre e náutico, possuindo características predominante padrões, pois seu sistema de acesso e operação de tarefas é igual, ou extremamente semelhante a outros receptores, motivando a escolha desse receptor para a coleta dos pontos, georreferenciamento da área e identificação dos locais de coleta (Figura 3).

Um ponto é uma “posição virtual” que se baseia no cruzamento de coordenadas (latitude e longitude), podendo ser criado de várias maneiras, entretanto, originando sempre uma posição com coordenadas específicas, podendo ou não ser enriquecido com comentários e símbolos.

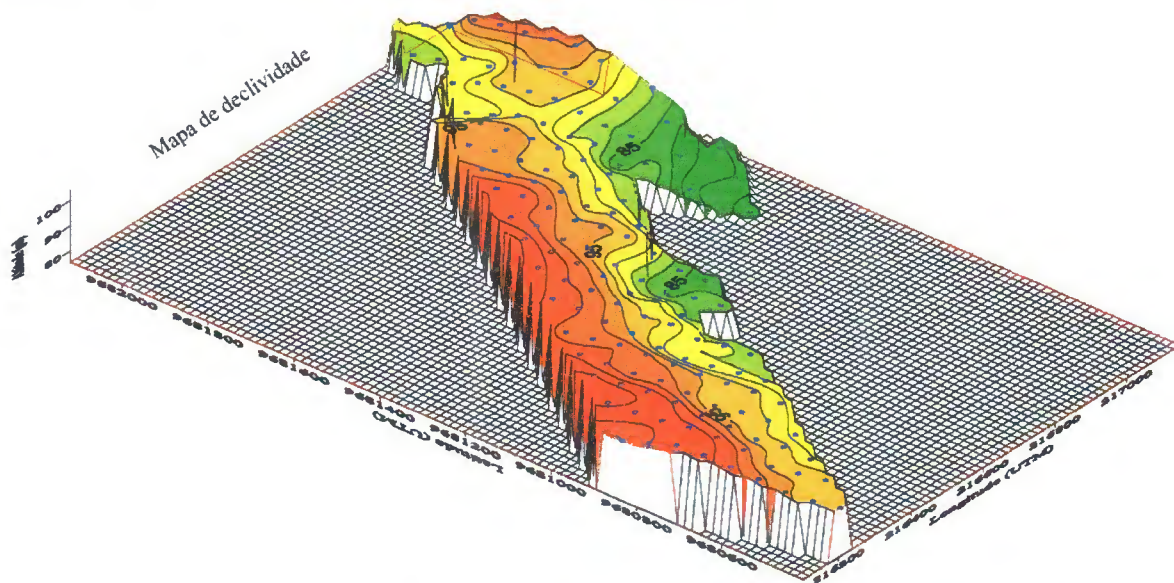


Figura 3. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Juparanã, Paragominas-PA (Maio de 20012). (a) Vista geral da plantação mostrando a declividade e (b) Linhas de plantio com cobertura (palhada).

3.3- Descrição da Área de Cultivo

A área selecionada foi denominada pela JUPARANÃ de T10 (talhão 10) cultivada com plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar BRS Sambaíba, plantadas em espaçamento de 0,5 entre linhas e 15 plantas por

metro linear totalizando 300.000 plantas por hectare, em sistema de plantio direto implantado nessa área a 8 anos.

A cobertura do solo foi consequência da safra anterior cultivada pelo milho e sucedida pelo pasto com *Braquiária Ruziziensis* o qual foi dessecado as vésperas do plantio da soja, com o solo coberto por massa seca das culturas anteriores, suficiente para boa proteção do solo. O plantio da soja foi feito em linhas retas sem a utilização de curvas de nível. A digitalização dos pontos amostrais foi feita utilizando-se o software SURFER 8.0 (Golden Software. 2002).

Os pontos para a construção da base da imagem foi a maior e a menor coordenada (latitude e longitude) do talhão, seguindo a metodologia de Farias et al. (2003). O talhão T10 possui 50 hectares e foi todo georreferenciado e dentro desse universo selecionado 150 pontos de amostragem onde ocorreram as coletas de solo e plantas (Figura 4).

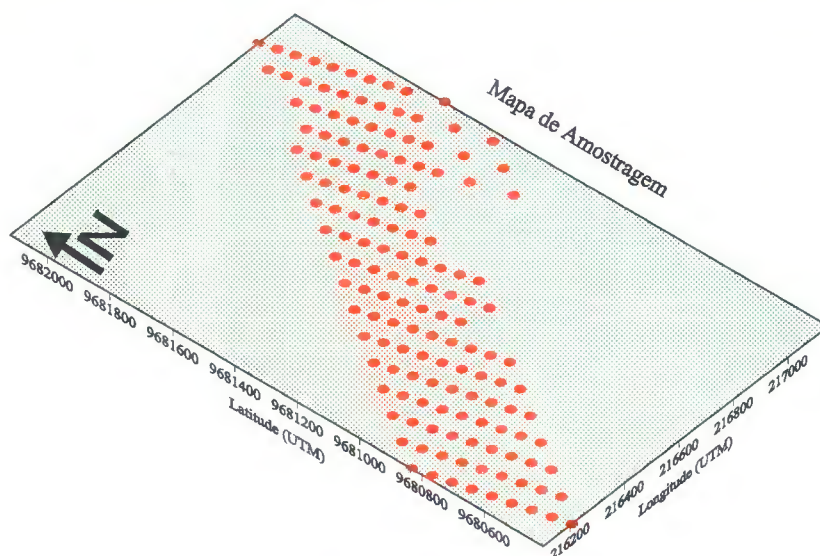


Figura 4. Mapa de localização dos locais de amostragem (latitude e longitude) do talhão 10, mostrando o esquema de pontos (●) de localização das amostras para análises físicas, químicas, de relevo e produtividade.

3.4. Amostragem dos Atributos Físicos e Químicos do Solo

A amostragem foi efetuada no início do mês de maio de 2012, onde em cada um dos 150 pontos georreferenciado (figura 4), foi coletada para a análise de solo uma amostra indeformada, na camada

superficial de 0 a 5 cm, em anel cilíndrico de aço inox com volume de 100 cm^3 , utilizando-se amostrador específico (Figura 5a e 5b) dessa amostra foram obtidos os dados de resistência a penetração, densidade e capacidade de campo, e uma amostra deformada na profundidade de 0 a 10 cm (Figura 5c e 5d), de onde foram adquiridos os dados granulométricos e químicos de todos os 150 pontos.

As análises químicas foram realizadas utilizando a metodologia descrita em Embrapa (1997) e efetuadas no Laboratório de Química do Solo do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Para as análises físicas as metodologias usadas foram: granulométricas foi utilizado o método da pipeta descrita em Gee&Balder (1986), densidade do solo o método do anel volumétrico (Embrapa 1997), capacidade de campo do solo método da mesa de tensão (Embrapa, 1997) e o ponto de murcha permanente foi determinado em WP4-T de Decagon Devices (2003).

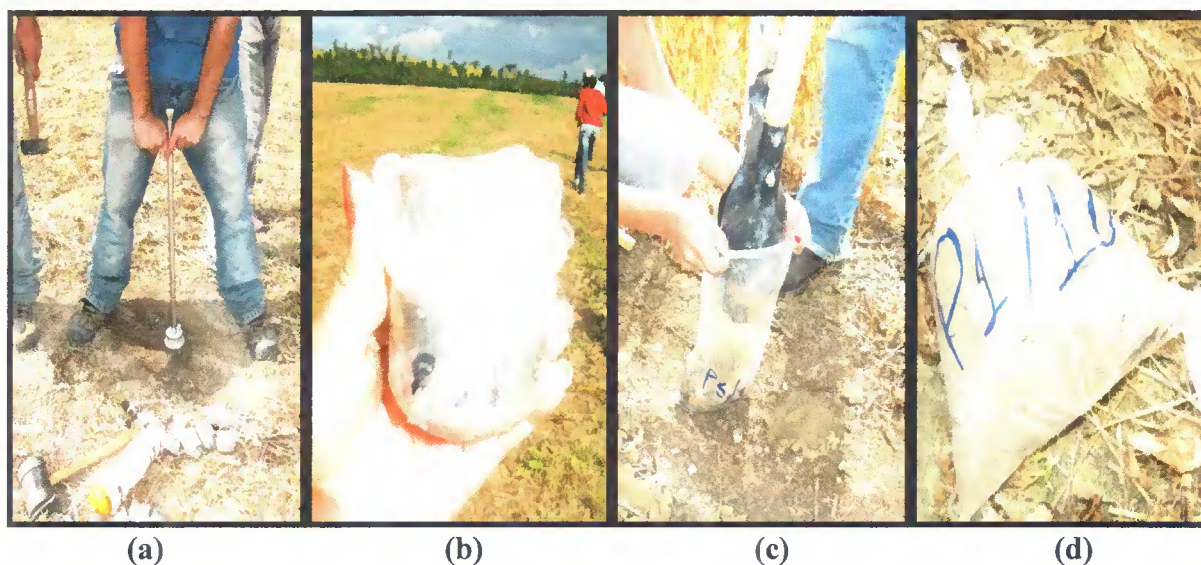


Figura 5. (a) coleta da amostra indeformada; (b) amostra indeformada embalada e identificada para análise; (c) coleta da amostra deformada; (d) amostra deformada embalada e identificada para análise.

3.5. Amostragem para Determinação da Produtividade

Para a determinação da produtividade, foram utilizados os mesmos 150 pontos georreferenciados utilizados para a coleta das amostras

usadas pra análises dos atributos do solo, onde as plantas, já no ponto de colheita, foram coletadas manualmente, utilizando-se um quadrado de 1,0 x 1,0 m para determinar a área de colheita (Figura 6a). Conforme eram coletadas as plantas, as mesmas eram acondicionadas em sacos de papel afim e evitar problemas com a umidade (Figura 6b) e posteriormente colocadas em sacos plásticos para evitar perda de grãos (Figura 6c), e levadas para secagem ao ar livre. Posteriormente, foram acondicionadas em um ambiente fechado para debulha manual e separação dos grãos da palha por peneiramento. Escolheu-se a debulha manual como forma de evitar possíveis perdas de grãos que normalmente ocorrem com a debulha mecanizada.

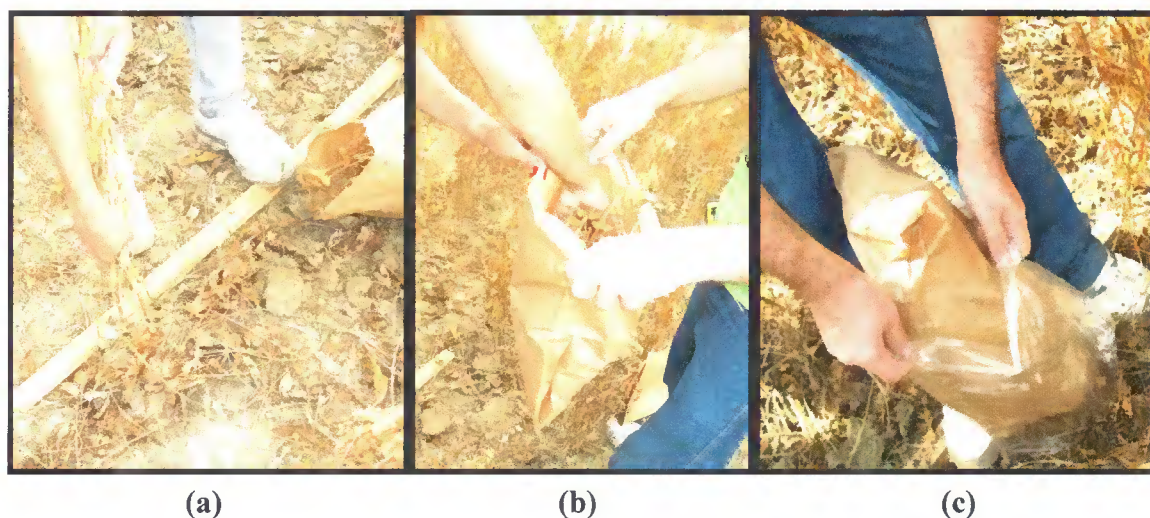


Figura 6. (a) coleta de plantas para análise de produtividade dentro do quadrado de 1m²; (b) amostra sendo guardada em saco de papel; (c) saco com a amostra sendo colocada em saco plástico para garantir que não ajam perdas.

A determinação do grau de umidade foi efetuada em estufa a 105° C durante 24 horas, utilizando-se uma amostra para cada lote, segundo as prescrições da Regra de Análise de Sementes - RAS (Brasil, 1980), sendo os resultados expressos em porcentagem.

A produtividade de grãos foi obtida do produto colhido manualmente na área útil das parcelas com umidade corrigida para 13% como segue:

$MC = ((100 - UI) * MI) / (100 - UC)$. Sendo: MI – massa inicial; MC – massa corrigida; UI – umidade inicial; UC umidade corrigida.

Os resultados de produtividade são apresentados em kg.ha⁻¹.

Em alguns pontos de amostragem não houve produção de soja, pois as mesmas

encontravam-se em local com o problema conhecido e ainda sem literatura definindo como soja loca, fato que impediu a produção da planta.

3.6. Estatística Descritiva

O objetivo primordial desta análise foi de caracterizar individualmente as variáveis quanto aos seus valores de tendência central e dispersão, através do estudo das suas distribuições de frequência. Para se atingir esse objetivo, os valores das diversas variáveis estudadas foram ordenados e analisados de acordo com seus histogramas, caracterizando-os com a média (\hat{m}), variância (s^2), erro padrão da média (EPM), coeficiente de variação (CV%), assimetria (μ_3) e curtose (μ_4).

Para cada atributo estudado, efetuou-se uma análise exploratória dos dados, no software EXCEL, não levando-se em consideração a posição geográfica da amostra; assim, foram calculados a média, a mediana, valores mínimo e máximo, o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

3.7. Geoestatística dos Dados

Utilizando a informação da posição da amostra e o valor que a variável assume em cada ponto, descreveu-se os procedimentos que melhor se adequaram para as análises das informações e montagem dos mapas. Desta forma, de cada amostra deve-se ter o valor da variável e as coordenadas do ponto onde foi coletada. As coordenadas devem ser expressas em um sistema de unidades que permita o cálculo da distância entre as amostras.

3.7.1 - Análise Variográfica: O Semivariograma Experimental

Os parâmetros e características do semivariograma, foram definidos com base no esquema mostrado na Figura 7.

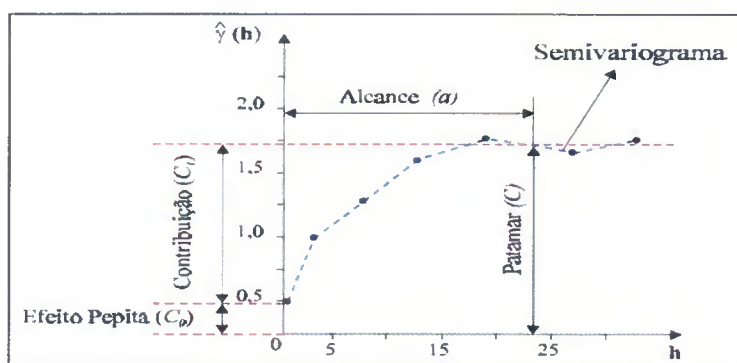


Figura 7. Esquema do semivariograma experimental (adaptado de Gerra, 1988).

Esquemáticamente a Figura 7 representa:

Alcance (a): À medida que a distância entre os pares aumenta, a variabilidade tenderá a aumentar até atingir um determinado nível. A distância onde o variograma atinge este nível é denominado de alcance ou “range”.

Patamar (C): Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza. Este patamar deve ser teoricamente igual à variância amostral. Este parâmetro é também denominado “Sill”.

Variância Espacial (C_1): Representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores.

Efeito Pepita (C_0): Para distância igual a zero ($h=0$), o variograma deveria apresentar variabilidade nula. Entretanto, vários fatores como erros de amostragens, erros de medidas ou ainda microregionalizações da variável em análise, causam uma descontinuidade na origem do variograma, denominado de efeito pepita (“nugget effect”).

3.7.1.1 - A Equação de Cálculo

O semivariograma é, por definição,

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

e pode ser estimado através de

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

onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $\gamma^*(h)$ “versus” os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , e portanto depende da magnitude e direção de h . Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção, ele é chamado isotrópico e representa uma situação bem mais simples do que quando é anisotrópico, isto é, muda de forma nas diferentes direções. É óbvio que isto depende muito da propriedade em estudo e das dimensões da área amostrada.

Para melhor compreender e interpretar os semivariogramas é preciso que se atente ao fato de que, para sua construção, não se utilizam os valores observados das variáveis aleatórias e sim as diferenças entre tais valores separados por uma determinada distância.

Desta forma, conhecendo a distância que separa dois pontos estima-se o valor da variância da diferença das variáveis aleatórias em estudo nos pontos. Isto só faz sentido admitindo-se a hipótese intrínseca de que tal variância não depende da localização dos pontos, mas apenas da distância entre eles.

Para malhas regulares, o semivariograma amostral é obtido da seguinte forma: 1) fixa-se um distância h (“lag”); 2) formam-se todos os pares de pontos separados por tal distância; 3) aplica-se a expressão do estimador adotado obtendo-se a semivariância estimada e 4) os pares de pontos formados pelas distâncias (eixo X) e semivariâncias (eixo Y) são assinaladas em um gráfico.

3.7.2 - Os Modelos

Dependendo do comportamento de $(\hat{\gamma}(h))$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar (“Sill”) e modelos sem patamar.

3.7.2.1 - Modelos com Patamar

Os modelos com patamar são normalmente ajustes que representam a estacionaridade de segunda ordem. A semivariância aumenta à medida que aumenta a distância entre as amostras, até atingir um patamar (“Sill”), onde se estabiliza. Este patamar deve ser teoricamente igual à variância amostral. A distância em que o semivariograma atinge o patamar é denominado de alcance (“range”), que corresponde ao raio de dependência da variável. Os modelos mais utilizados dentro deste grupo estão representados na Figura 6.

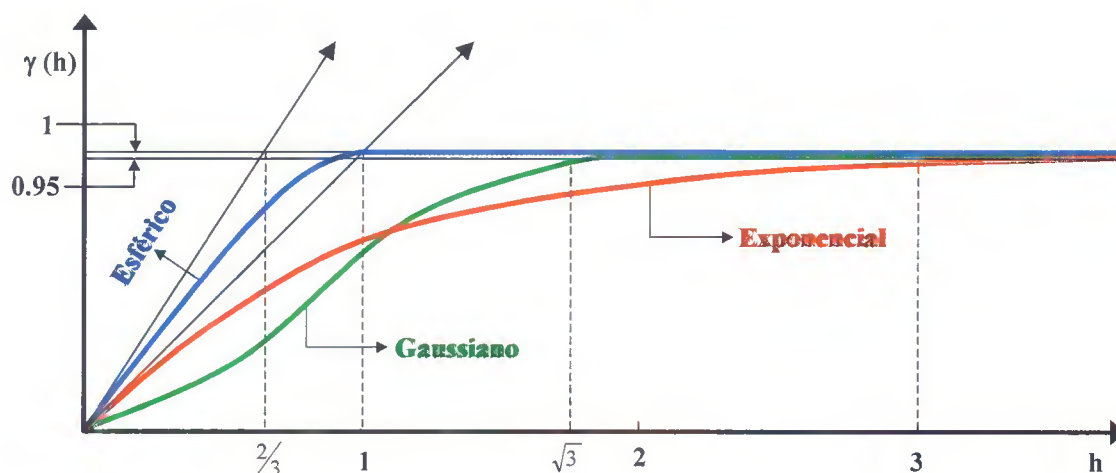


Figura 8. Semivariograma com Patamar (adaptado de Rendu, 1978).

Na Figura 8 percebe-se que para uma mesma distância h , os três modelos apresentam variações diferentes (eixo $\gamma(h)$), ou de outra forma, as distâncias onde a tangente na origem intercepta o patamar são diferentes. Assim, na existência de grande continuidade deve-se preferir o modelo gaussiano.

O modelo esférico alcança um patamar a uma distância h finita, enquanto o modelo exponencial alcança seu patamar somente assintoticamente. Contudo, devido às flutuações experimentais do variograma, não serão feitas distinções entre um patamar efetivo e um patamar assintótico.

3.7.2.1.1 - Modelo Esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \quad 0 < h < a \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, \quad h \geq a$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, C_1 , depois passando-se uma reta que intercepte o eixo-y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa tangente cruzará o patamar à distância, $a'=2/3 a$. Assim, o alcance, a , será $a=3a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3 a$.

3.7.2.1.2. Modelo Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right], \quad 0 < h < d \quad (4)$$

onde d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

3.7.2.1.3. Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3(\frac{h}{a})^2)], \quad 0 < h < d \quad (5)$$

A função é parabólica próxima à origem. Este modelo apresenta um alcance extenso e o patamar semelhante ao modelo exponencial.

3.7.2.1.4. Modelo Aleatório (Efeito Pepita Puro)

$$\gamma(h) = C, \quad \text{para qualquer } h \quad (6)$$

À medida que aumenta a descontinuidade na origem do semivariograma, mais aleatório é o fenômeno que originou a variável em análise. Esta característica decorre de uma provável regionalização, inferior à escala de trabalho da malha de amostragem e/ou às variações espúrias associadas com a coleta e medição das amostras.

3.7.3. Estimação: O Preditor de Krigagem

Muitas vezes o interesse da análise não se esgota em modelar a estrutura de variabilidade. Em diversas situações o interesse está na estimação de valores em pontos não amostrados, seja por um interesse local ou pela intenção de obter um detalhamento da área que vai além do permitido pela amostra. Nestes casos é preciso lançar mão de algum interpolador (preditor) dentre os existentes na literatura.

A proposta de predição Geoestatística é a krigagem. Uma vez que as observações são dependentes, ao menos a certas distâncias, utilizam-se os vizinhos, de forma que o preditor é, simplesmente, uma média ponderada dos valores observados na vizinhança.

Supondo-se que se queira estimar valores, z^* , para qualquer local, x_0 , onde não se tem valores medidos, e que a estimativa deve ser uma combinação linear dos valores medidos, tem-se:

$$z_{\square}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (7)$$

onde N é o número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$. Tomando-se $z(x_i)$ como uma realização da função aleatória $Z(x_i)$, e, por hora, assumindo estacionaridade de ordem 2, o estimador fica:

$$Z_{\square}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (8)$$

Note-se que o estimador acima não apresenta qualquer novidade, pois, praticamente, todos os métodos de interpolação seguem esta forma. Por exemplo, na interpolação linear os pesos são todos iguais a $1/N$ e na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos recebem valores variáveis de acordo com o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores medidos usados. No método da krigagem, os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma.

3.7.3.1 - As Condições Requeridas

Para que o estimador seja ótimo, ele não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima. Matematicamente,

$$E [Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (9)$$

e

$$VAR [Z^*(x_0)] = E \{ [Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 \}, \quad \text{mínima.} \quad (10)$$

Estas duas condições devem ser rigorosamente satisfeitas. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças, ponto por ponto, entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas.

Pode parecer estranho quando se fala em diferenças entre valor estimado e medido, quando o propósito da krigagem é justamente estimar valores para locais onde estes não foram medidos. Porém, as condições impostas nas equações (9) e (10), são feitas tendo-se em mente o que poderia acontecer se o valor naquele ponto fosse conhecido. Em outras palavras, o objetivo é que a estimativa represente, o melhor possível, o que seria o valor medido para aquele local.

Entretanto esta expressão não é exclusiva deste preditor. O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é o critério utilizado para obtenção dos pesos \square_i .

Mas não apenas a distância dos vizinhos ao ponto a ser estimado deve ser considerada. Também as distâncias entre os vizinhos devem influir na atribuição dos pesos. Vizinhos agrupados devem ter importância individual relativamente menor do que aqueles isolados.

3.8 - Programas Utilizados nas Análises

Na análise dos dados testaram-se vários programas para obtenção do semivariograma, entre os quais: o módulo PREVAR do Geo-EAS, VARIOWIN e o GEOESTAT, programa desenvolvido pelo pesquisador Sidney Rosa Vieira (IAC - Campinas) e modificado para

Windows pelo Professor José Carlos Barbosa do Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP - Jaboticabal. O programa adotado foi o GEOESTAT pela facilidade de utilização, formatação e elaboração gráfica e também por apresentar a conveniência de não ser programa tipo “caixa-preta”.

Quando o interesse é ter uma idéia visual do comportamento das variáveis na área, utiliza-se uma representação gráfica onde as coordenadas dos pontos e os valores da variável são representados em um sistema. Este mapa é construído a partir de uma malha obtida por aplicações sucessivas da krigagem.

A representação pode ser tridimensional, através do desenho de uma superfície onde o eixo Z corresponde ao valor do atributo em cada ponto identificado nos eixos X e Y. Outra opção é uma representação bidimensional através da confecção de mapas de isolinhas (contornos). Esses mapas foram gerados pelo programa SURFER 8.0 para Windows que desenha mapas com as informações obtidas no semivariograma.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O potencial de produtividade obtido pela amostragem dos 150 pontos, possibilitou estimar a produtividade da área, onde observou-se um CV alto igual a 26%, apesar de termos obtido valor mínimo de produtividade igual a 0,00 kg ha⁻¹ (Tabela 1) isso representou apenas 1,33% da área estudada, já a média que foi igual a 3.093 (Tabela 1) apresentou uma produtividade acima da média nacional de 2.937 e do estado 3.077 (IBGE, 2013), no entanto cerca de 48% da área apresentou produtividade abaixo da média da área o que demonstra quando comparado com o valor máximo obtido que foi igual a 5.808 (Tabela 1) entorno de 88% maior que a media, o que demonstra o potencial a ser explorado na área.

Tabela1. Estatística descritiva das análises físicas, químicas e da produtividade de soja sob plantio direto em Paragominas - PA (maio de 2012).

Atributos	Média	Mediana	Valor		DP	CV
			Mínimo	Máximo		%
Densidade do Solo (g cm ⁻³)	1,09	1,08	0,85	1,33	0,11	10
Resistência à Penetração (MPa)	1,66	1,64	0,42	3,22	0,71	43
Umidade na capacidade de campo (cm ³ cm ⁻³)	0,35	0,35	0,30	0,41	0,03	9
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	42,55	40,58	22,50	97,39	10,74	25
pH água	5,60	5,58	4,16	7,38	0,53	10
pH KCl	5,15	5,11	3,89	7,14	0,55	11
Fósforo (mg dm ⁻³)	27,17	17,23	0,02	104,76	25,50	94
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,26	0,25	0,02	0,94	0,10	38
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	3,49	3,37	1,01	7,58	1,17	33
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	1,03	1,01	0,17	2,02	0,36	35
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,22	0,15	0,10	1,27	0,18	81
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	4,62	4,43	0,10	7,87	1,42	31
Produtividade (kg ha ⁻¹)	3093,8	3108,26	0,00	5808,77	799	26

O estudo da área mostrou a predominância de um solo argiloso com valores médios de densidade do solo (Ds) iguais a 1,09 (g cm⁻³) (Tabela 1); segundo REINERT et al., 2001, valores

acima de $1,45 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ em solos com textura argilosa, possuem restrições no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, pois são caracterizados como solos compactados. O coeficiente de variação (CV) para Ds apresentou uma baixa variabilidade segundo classificação proposta por Gomes (2000), sendo igual a 10% concordando com o observado por Rosa Filho et al. (2009) e Carvalho et al. (2002) em áreas cultivadas com a cultura da soja em sistemas de plantio direto, e discordando de Silva (2009) que obteve resultados que classificaram o CV para Ds como médio.

Gomes (2000) classificou a variabilidade obtida a partir do coeficiente de variação considerando, baixo ($\text{CV} < 10\%$); médio ($10\% < \text{CV} < 20\%$); alto ($20\% < \text{CV} < 30\%$) e muito alto ($\text{CV} > 30\%$), classificação essa que tem sido adotada em muitos trabalhos relacionados a estudos do solo, por ser uma medida adimensional e possibilitar a comparação da variabilidade de duas variáveis.

A resistência a penetração (RP) média foi igual a 1,66 MPa (Tabela1), média essa que segundo Petter (1990), em seu estudos realizados a campo verificou que valores acima de 2,8 MPa como sendo restritivos ao crescimento de raízes de soja, embora a média RP tenha ficado abaixo deste valor quando visualizamos o valor máximo que foi de 3,22 MPa para RP (Tabela1), e o CV igual 43% classificado como muito alto percebemos a necessidade de trabalharmos a área com medidas que venham a remediar estes pontos de compactação. Compactação essa demonstrada na mudança da estrutura do solo, e que possivelmente seja causada pela utilização de implementos, visto que o CV da umidade na capacidade de campo (Ucc) foi igual a 9% que é classificado como baixo, mostrando que essa variação da RP não foi causada pela Ucc.

As variáveis químicas do pH (água e KCl), apresentaram CV médios e muito alto para as outras P, K, Ca, Mg, Al, e para a acidez potencial (Tabela 1), semelhante al encontrado por Cavalcante et al. (2007) que também obteve resultados classificados como muito alto para P, K e Mg em sistema de plantio direto. No entanto Montanari et al. acredita que mesmo que os valores de CV sejam moderados, não servem como um bom indicador de variabilidade espacial de atributos do solo, pois podem ocorrer no campo valores extremamente altos ou baixos.

Apesar da ocorrência de algumas distribuições assimétricas, os valores da média e mediana de todos os atributos químicos, físicos e de produtividade estudados são próximos, mostrando que os dados não apresentam assimetria forte; conforme Little & Hills (1978), quando os valores da média e mediana são semelhantes, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal. Isso pode ser indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELA et al., 1994), demonstrando que

todos os atributos envolvidos no estudo estão se aproximando da distribuição normal, sinalizando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

Segundo Vanni (1998), quando se obtém um coeficiente de variação menor que 35% demonstra que a série é homogênea o que torna a média significativa, valores estes observados nos resultados dos coeficientes de variação dos atributos Ds, Ucc, MO, pH água, pH KCl, Ca, acidez potencial e na produtividade, no entanto quando o coeficiente de variação é maior que 35% revela que a série é heterogênea e a média tem pouco significado, observado nos resultados do CV dos atributos RP, K, e Mg, e se for maior que 65% a série é muito heterogênea e a média não tem significado algum, observado nos resultados do CV dos atributos P e Al.

Observou-se uma alta variabilidade na área estudada no que diz respeito aos números da produtividade (Figura 9), com a produção variando de 0,00 a 5808 kg ha⁻¹ de soja, cujo a média de produtividade foi de 3093 kg ha⁻¹, representando apenas 43% do potencial total da área. Da produtividade total, aproximadamente 52% é representada por plantas com produção superior a media da área. Pela Figura 9, observa-se que a área tem potencial para produzir bem acima da média da área. Os resultados obtidos na área do experimento, demonstra que a partir da utilização de técnicas de agricultura de precisão, poderíamos intervir em pontos necessários apontados pelos resultados, seria possível aumentar a produtividade em mais de 40%. Baseado no conhecimento da variação do rendimento de grãos de local para local.

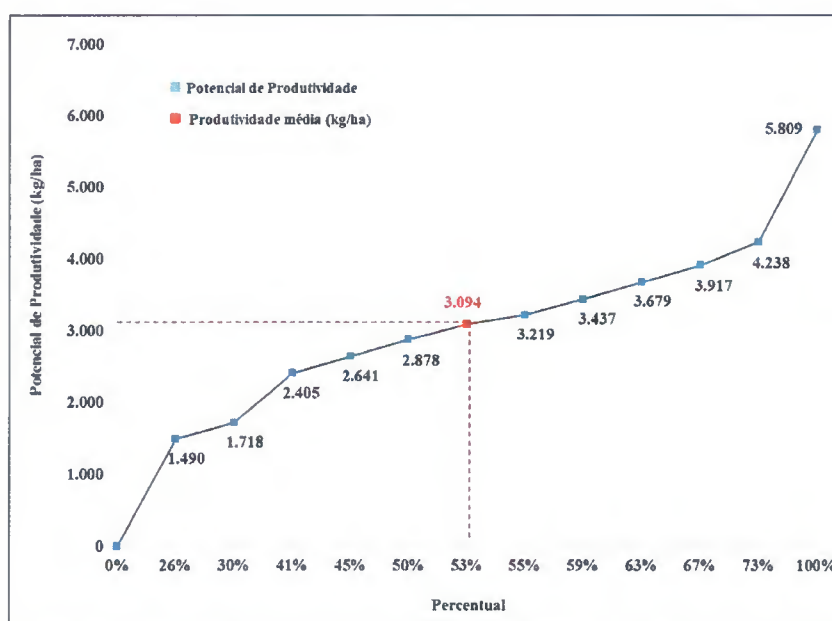


Figura 9. Produtividade média e potencial da soja, em sistema de plantio direto, em Paragominas-PA.

A partir do conhecimento preliminar dos dados estatísticos das variáveis da área em estudo, passou-se à análise variográfica, procurando-se conhecer com a máxima precisão possível o grau de continuidade dessas variáveis e as características qualitativas da regionalização. A ferramenta fundamental para essa análise em Geoestatística é o semivariograma.

As análises variográficas foram elaboradas para uma direção global isotrópica destas variáveis no espaço, permitindo o ajuste de modelos matemáticos a esses semivariogramas. Para tal foram estudados os principais modelos variográficos teóricos com patamar, conforme mostrado na Figura 10.

Na Figura 10a, está representado o mapa de declividade do terreno com valores médios de 5,3%, que se enquadra na classe de relevo suave ondulado. Faz-se importante destacar que práticas conservacionistas simples como, curvas de níveis, não foram utilizadas na implantação do cultivo, apesar do relevo contribuir para o acúmulo de água, durante o período chuvoso, nos pontos mais baixos do terreno.

Os mapas de distribuição espacial (Figuras 10 a 17) foram obtidos por interpolação (krigagem), a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, a fim de estimar valores em locais não amostrados. O mapa de produtividade (Figura 10b), o do relevo (Figura 10a), o do atributo físico (Figura 13b), e os de atributos químicos (Figuras 14 a 17).

O mapa de krigagem da produtividade (Figura 10b) mostra que os pontos de maior produtividade coincidem com as partes mais altas do terreno (Figura 10a) (102,99 m). E os pontos de menor produtividade com os pontos mais baixos (76,08 m). Este fato sugere que pela área ser cultivada em sistema de plantio direto, o sistema tem conseguido reduzir os processos erosivos, diminuindo o arraste de partículas e, conseqüentemente, reduzindo a perda de nutrientes dos pontos mais altos para o mais baixos, mesmo nos pontos de maior declividade, já a produtividade mais baixa nos pontos de menor altitude pode ter sido causada pelo acúmulo de água que prejudica a aeração solo e a respiração das raízes culminando com a diminuição da produtividade.

O comparativo de dos mapas de produtividade (Figura 10b) com o mapa que apresenta o relevo (Figura 10a), demonstra uma relação bem clara, no entanto esse resultado diverge do encontrado por Silva, 2009, que obteve a maior produtividade nas áreas mais baixas em virtude do deslocamento dos nutrientes pelos processos erosivos.

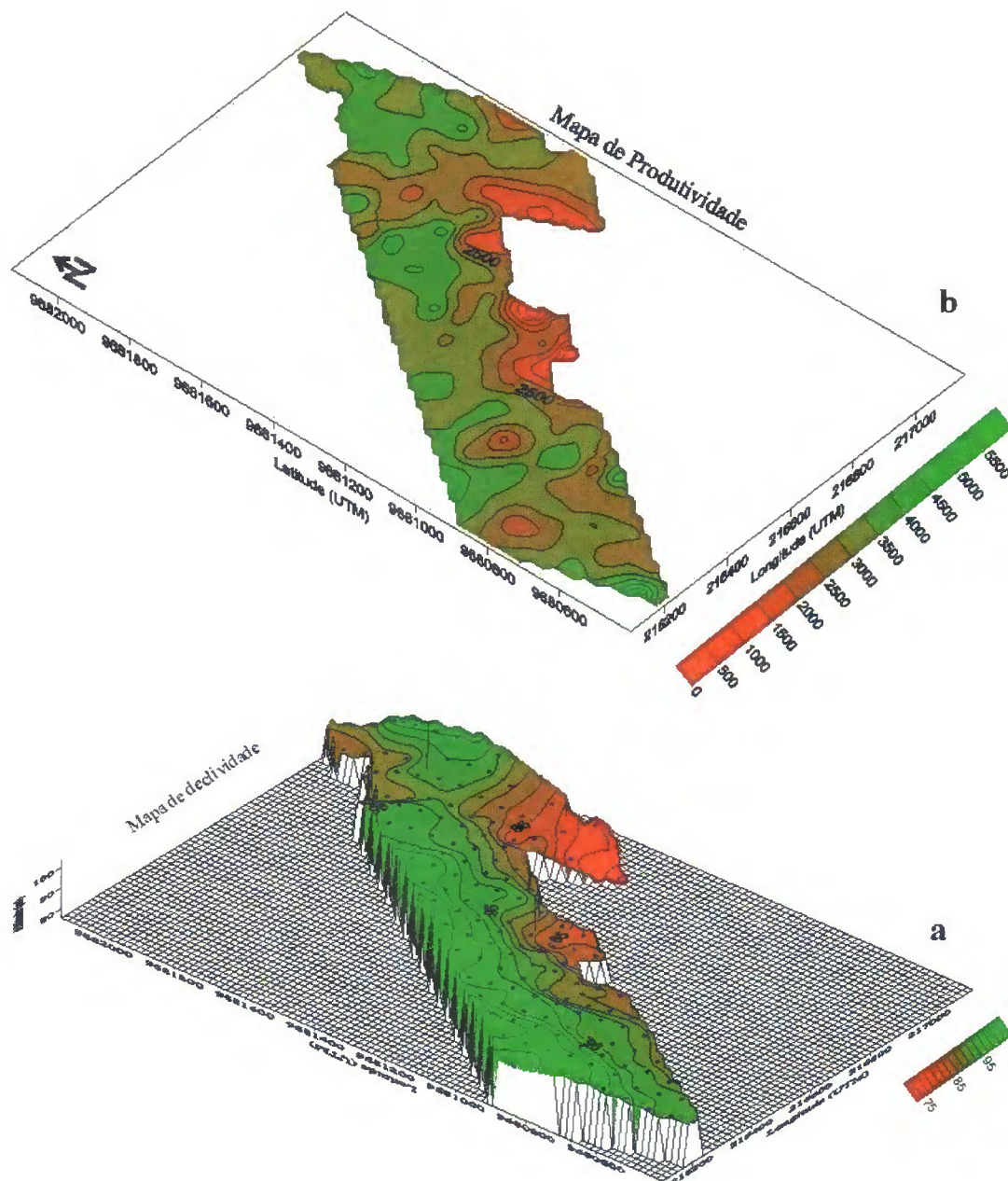


Figura 10. Variabilidade espacial da declividade (a), produtividade da soja sob plantio direto em Paragominas-PA (maio de 2012).

O Mapa de produtividade (Figura 10a) mostra que há áreas com maior e menor produção dentro da área. As áreas com o verde mais intenso indica área que apresentam um grande potencial de produtividade, produtividade bem acima da média. Identificar e estudar essas áreas é de suma importância para o aumento da produção de soja na região de Paragominas e no estado do Pará. Este resultado está de acordo com vários autores que estudaram a variabilidade de

produção de diferentes culturas (FARIAS et al, 2003; JOHANN et al, 2004; OLIVEIRA et al, 2007; MOLIN et al, 2007; SANTOS et al, 2012 e FERRAZ et al, 2011).

A correlação espacial fica evidenciada, em virtude de todos os dados de amostragem terem se ajustados aos modelos. Com exceção dos resultados obtidos para as variáveis densidade do solo (DS) e a resistência a penetração (RP) cujo o resultado foi aleatório ou seja não foi percebida uma dependência espacial.

A análise geoestatística, efetuada por meio do semivariograma, demonstrou que as variáveis pH H₂O, pH KCl, C orgânico, matéria orgânica, potássio, magnésio e acidez potencial, ou seja a maioria das variáveis ajustaram-se ao modelo Gaussiano, já as variáveis densidade e resistência à penetração do solo se ajustaram ao modelo aleatório, onde não pode se estabelecer dependência, já a umidade na capacidade de campo foi a única que se ajustou ao modelo exponencial, o fósforo e o alumínio se ajustaram ao modelo linear e cálcio e a produtividade se ajustaram ao modelo esférico (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas das variáveis estudadas, ajustados aos modelos.

Variáveis	Parâmetros			Modelo	k	Dependência Espacial
	C0	C1	a(m)			
Densidade do solo (g cm ⁻³)	0,0119	-	-	Aleatório	-	-
Resistência à penetração (MPa)	0,4500	-	-	Aleatório	-	-
Umidade na capacidade de campo (cm ³ cm ⁻³)	0,0007	0,0002	80	Exponencial	0,8202	Forte
pH água	0,0650	0,2050	60	Gaussiano	0,2407	Fraca
pH KCl	0,1000	0,1900	70	Gaussiano	0,3448	Moderada
C org.	12,0000	28,0000	70	Gaussiano	0,3000	Moderada
M. O.	38,0000	80,0000	70	Gaussiano	0,3220	Moderada
Fósforo (mg dm ⁻³)	570,0000	0,1580	1	Linear	0,9997	Forte
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,0022	0,0075	70	Gaussiano	0,2268	Fraca
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	1,0000	0,4500	130	Esférico	0,6897	Forte
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,0500	0,0620	60	Gaussiano	0,4464	Moderada
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,0125	0,0000	1	Linear	0,9963	Forte
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	0,6500	1,4500	80	Gaussiano	0,3095	Moderada
Produtividade (kg ha ⁻¹)	300000,0000	425000,0000	425	Esférico	0,4138	Moderada

C0: efeito pepita; C1: variância espacial; a: alcance; k: índice de dependência espacial.

Os dados encontrados discordam daqueles observados por Carvalho et al. (2002) que afirmam ser o modelo matemático esférico, ajustado a todos os semivariogramas, o que predomina nos trabalhos em ciência do solo.

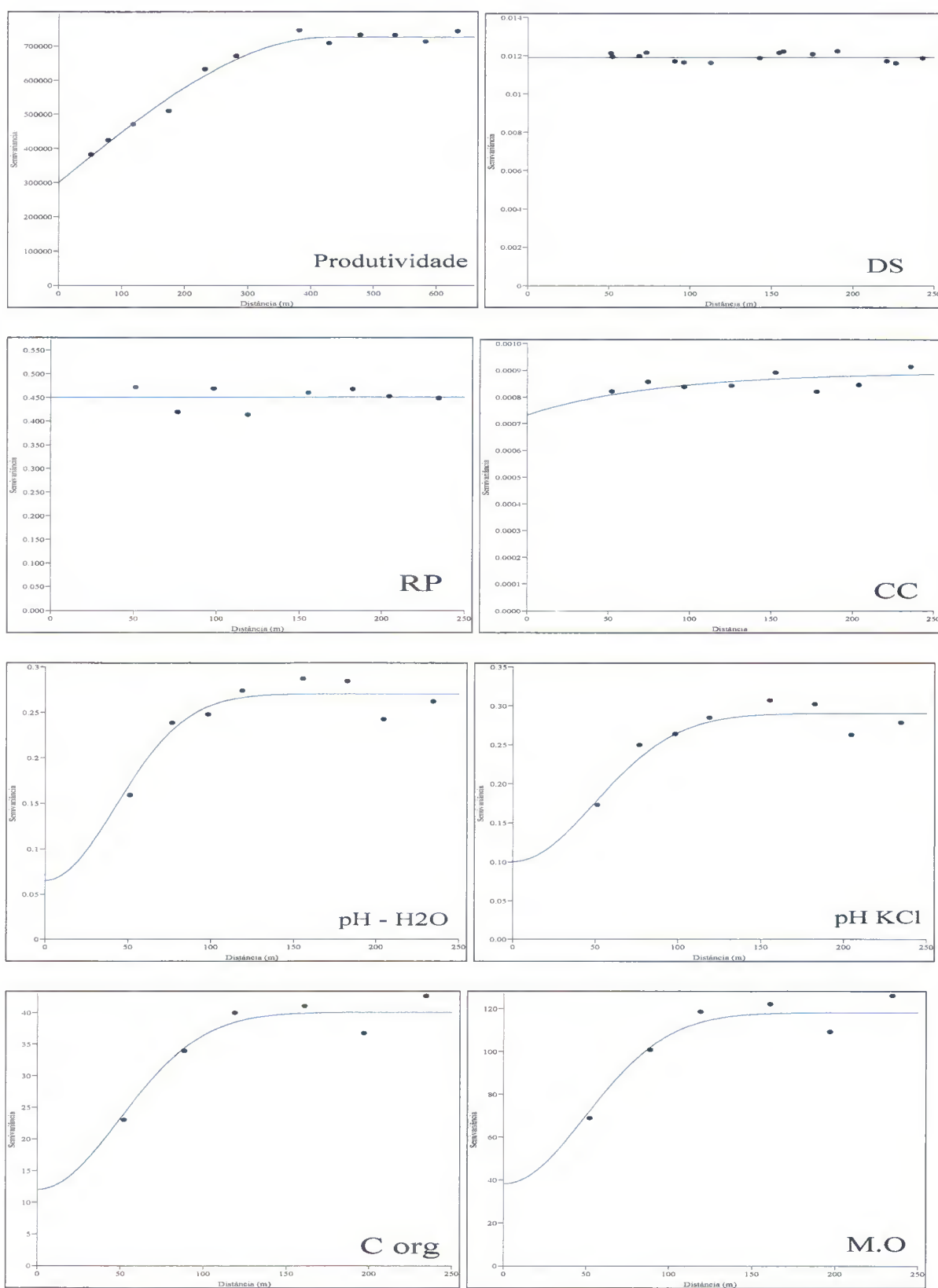


Figura 11. Semivariograma da produtividade, densidade do solo (DS), resistência a penetração (RP), capacidade de campo (CC), pH H₂O, pH KCl, carbono orgânico (C org), matéria orgânica (M.O.).

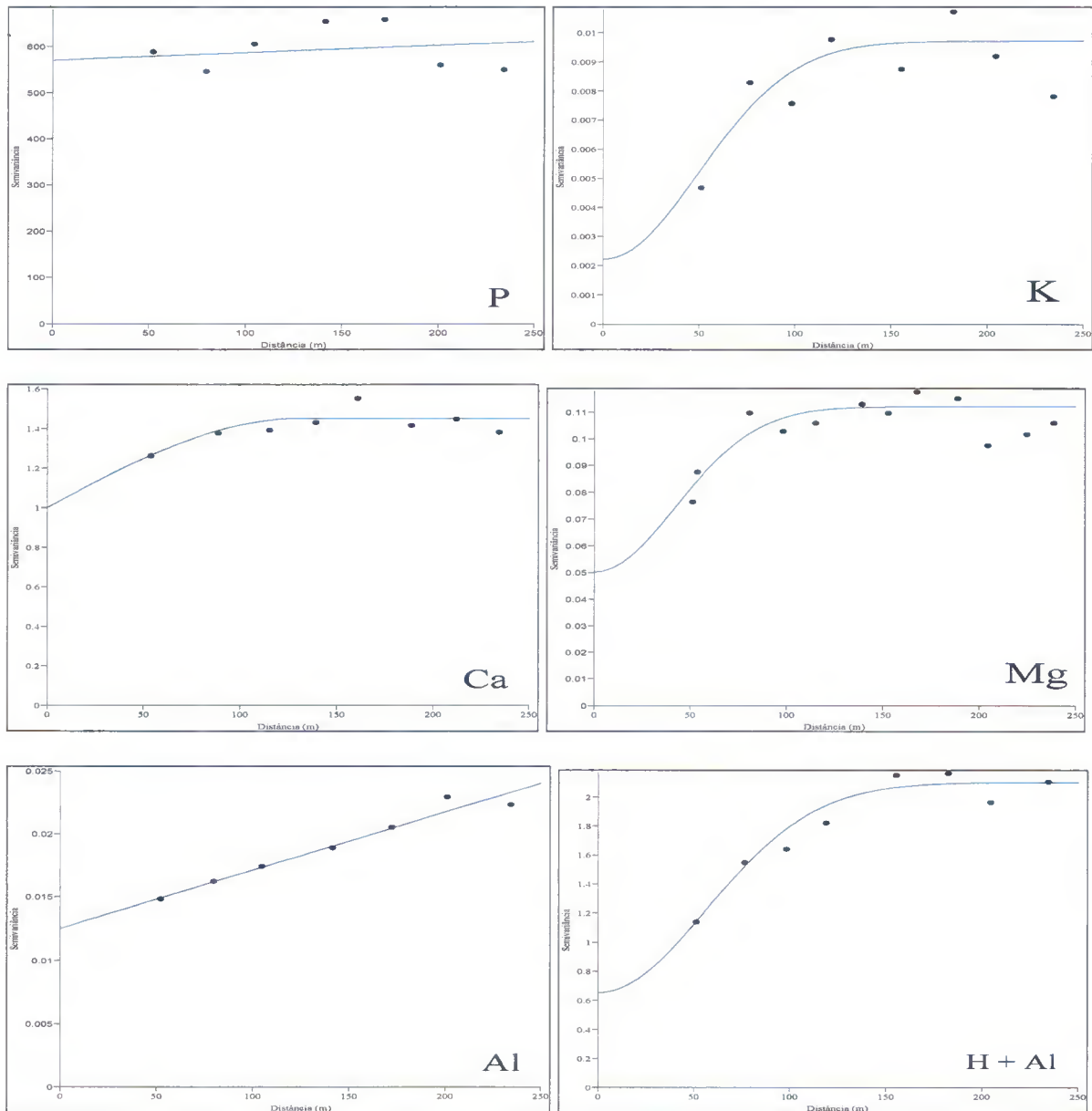


Figura 12. Semivariograma do fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), e acidez potencial (H + Al).

O semivariograma para a produtividade obteve seus ajustes através do modelo esférico, apresenta alcance de 420 m, o que demonstra uma certa homogeneidade na área, isso se deve principalmente pelos trabalhos de AP que foram iniciados em 2012, e apresentou uma dependência espacial moderada.

Para os atributos físicos só a umidade na capacidade de campo (CC) se encaixou em um modelo definido, exponencial, apresenta alcance de 80 m e uma dependência espacial forte, já as variáveis DS e RP foram classificadas como aleatórias por isso não obtivemos o

alcance e pois não houve dependência espacial.

Para os atributos químicos, pH em água e pH em KCl, o alcance é de 60 m e 70m respectivamente, e obtiveram uma dependência fraca para o pH em água e moderada para pH em KCl, um alcance de 80 m para a acidez potencial com uma dependência espacial moderada, e os mesmos se ajustaram pelo modelo gaussiano (Tabela 2 e Figura 11 e 12). As variáveis carbono orgânico (C org.) e matéria orgânica (M.O.) também se ajustaram no modelo gaussiano e obtiveram resultados iguais para o alcance que foi de 70 m com uma dependência espacial moderada.

O semivariograma das variáveis químicas fósforo (P) e alumínio (Al) foram ajustadas pelo modelo linear e obtiveram o menor alcance, 1 m e a dependência espacial forte. O potássio (K) e o magnésio (Mg) obtiveram um alcance de 70 m e 60 m e uma dependência espacial fraca e moderada respectivamente e ambos ajustados pelo modelo gaussiano. A variável cálcio (Ca) assim como a produtividade usou o modelo esférico e seu alcance ficou em 130 m com uma dependência espacial forte. (Tabela 2 e Figura 12).

O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas, pois indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si, do que os separados por distâncias maiores (CARVALHO et al., 2002). O alcance da dependência espacial é um atributo importante no estudo dos semivariogramas, haja vista que representa a distância máxima em que os pontos amostrais estão correlacionados espacialmente entre si (CHAVES e FARIAS, 2009).

Buscando uma melhor definição dos parâmetros variográficos, foram feitas várias tentativas com ajuste aos modelos esférico, exponencial e gaussiano, com diferentes distâncias entre pares. Em todos os ajustes de pares para estimar a dependência espacial das variáveis o número de pares foi sempre maior que 30 pares. O número de pares e as distâncias estão de acordo com GUERRA (1988) que cita que o número de pares com que foi calculado o semivariograma experimental desempenha um papel importante, sendo necessário ao menos 30 pares. Quanto a distância máxima, o mesmo autor cita que na prática a área de estudo variográfico, raramente ultrapassa a metade do campo total amostrado.

Na Figura 13 é possível relacionar a umidade na capacidade de campo (CC) (Figura 13b) com a produtividade (Figura 13a) as áreas que tiveram as piores produtividades tiveram também os menores resultados de CC e os pontos com melhores resultados de CC obtiveram uma boa produtividade (destaque na Figura 13), acima da média, no entanto tivemos áreas com uma

produtividade também acima da média mas com a CC baixa.

De acordo com Silva et al. (2004), em lavouras sob plantio direto, o tráfego de máquinas provoca distintos estados de compactação. O maior estado de compactação ocorre na região dita bordadura da lavoura, (destaque da Figura 13a) onde as máquinas realizam as manobras e o estado de compactação vai reduzindo-se para o centro da lavoura, no entanto isso só é visto na parte direita da área (em destaque Figura 13a), pois a área possui em seu redor uma estrada que é utilizada para manobra das máquinas.

Segundo Nolla e Anghinoni (2004), o pH é um dos indicadores que podem ser utilizados para definir se há ou não necessidade de calagem. E a acidez potencial tem sido utilizada para determinar a dose de corretivo por aplicar no solo para atingir objetivos preestabelecidos.

Pode-se notar na Figura 14 que as áreas cujo o pH é menor (Figura 14c), a acidez potencial (Figura 14b) é maior e a produtividade menor (Figura 14a) e a grande variação dentro da área do pH e da acidez potencial demonstra a necessidade de tratarmos de forma localizada as aplicações dos insumos, pois pode ver que se for feita uma calagem baseada na média das amostras, forma tradicional, existiram locais que receberam dose de calcário acima do necessário ocasionando desperdícios e dosagens alta que pode ocasionar problemas para absorção de outros nutrientes e até causar danos diretos as plantas, a sim com termos com esse modelo de aplicação problemas de sub dosagem onde ainda iremos ter problemas com o pH baixo.

A Figura 15 compara o mapa de produtividade (Figura 15a) com os mapas de carbono orgânico (C org.) (Figura 15c) e matéria orgânica (M.O.) (Figura 15b), e nessa comparação pode ver que o C org. e a M.O. possuem uma relação muito próxima, nota-se até pela semelhança entre os mapas, pode-se notar também que os pontos de menor produtividade possuem valores baixos tanto de C org. quanto de M.O. (destacado com um círculo Figura 15) e pontos onde o C org. e a M.O. tiveram seus melhores resultados tivemos uma boa produtividade (destacado com triângulo Figura 15).

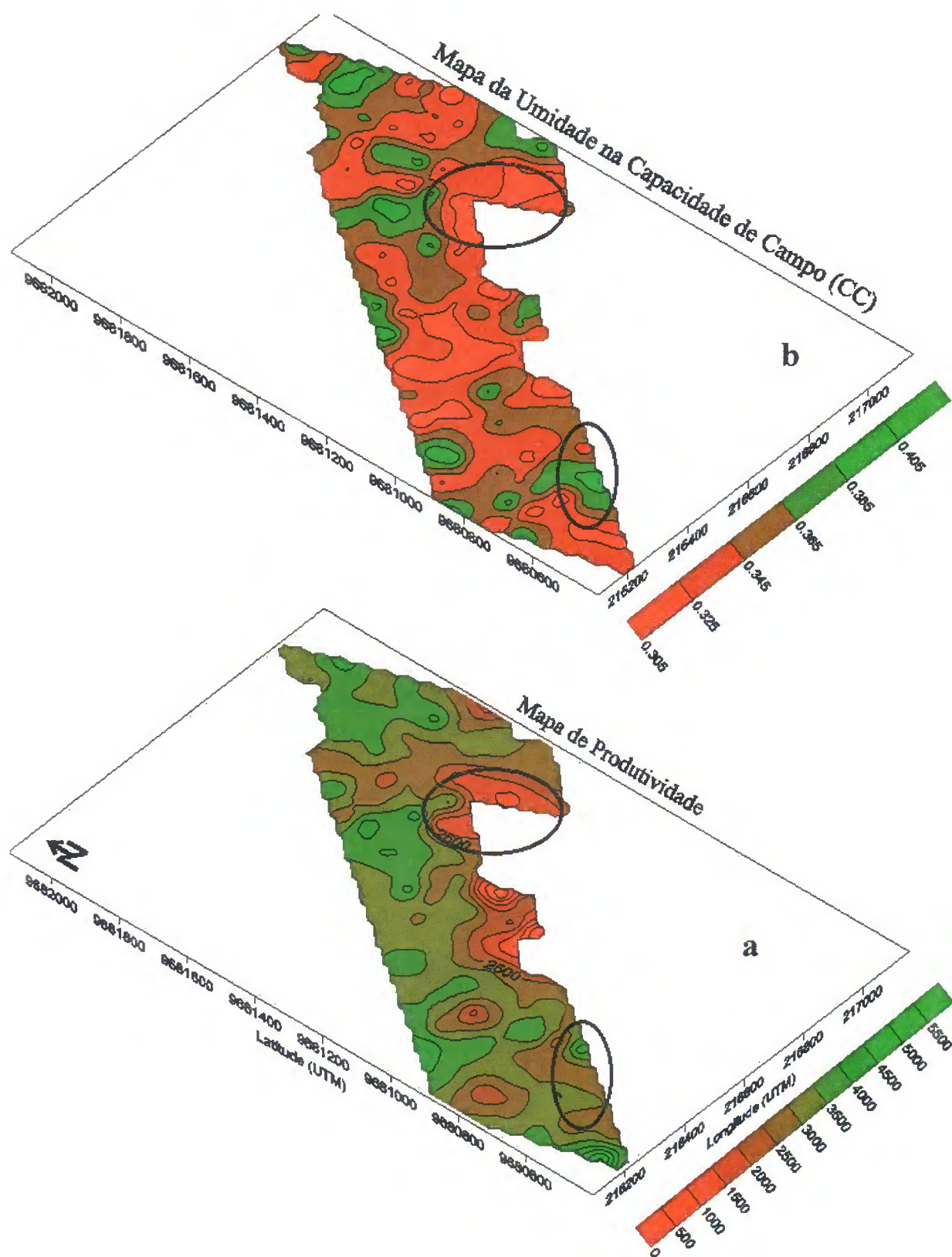


Figura 13. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a) e da umidade na capacidade de campo (b).

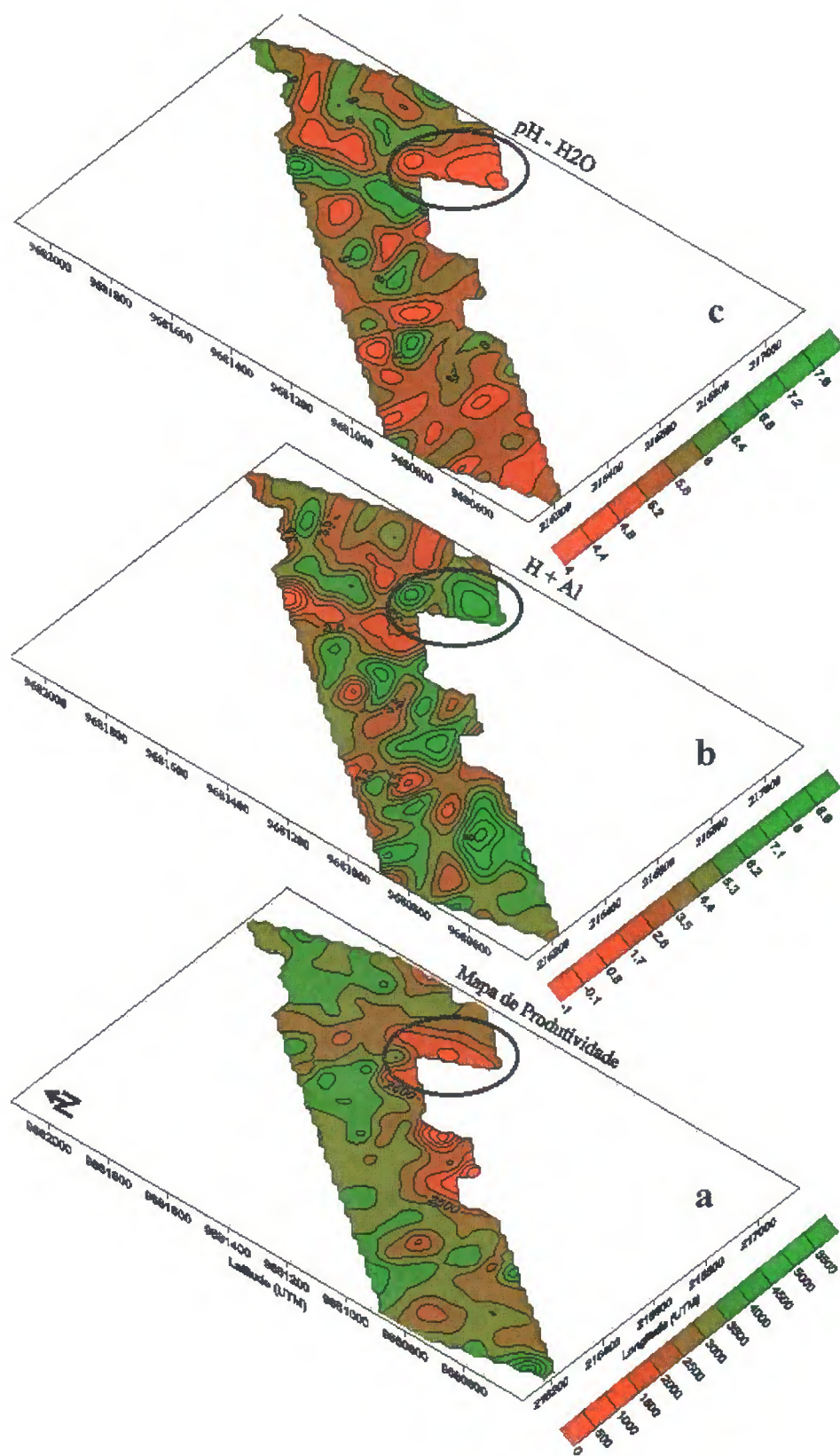


Figura 14. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), acidez potencial (b) e pH em água (c).

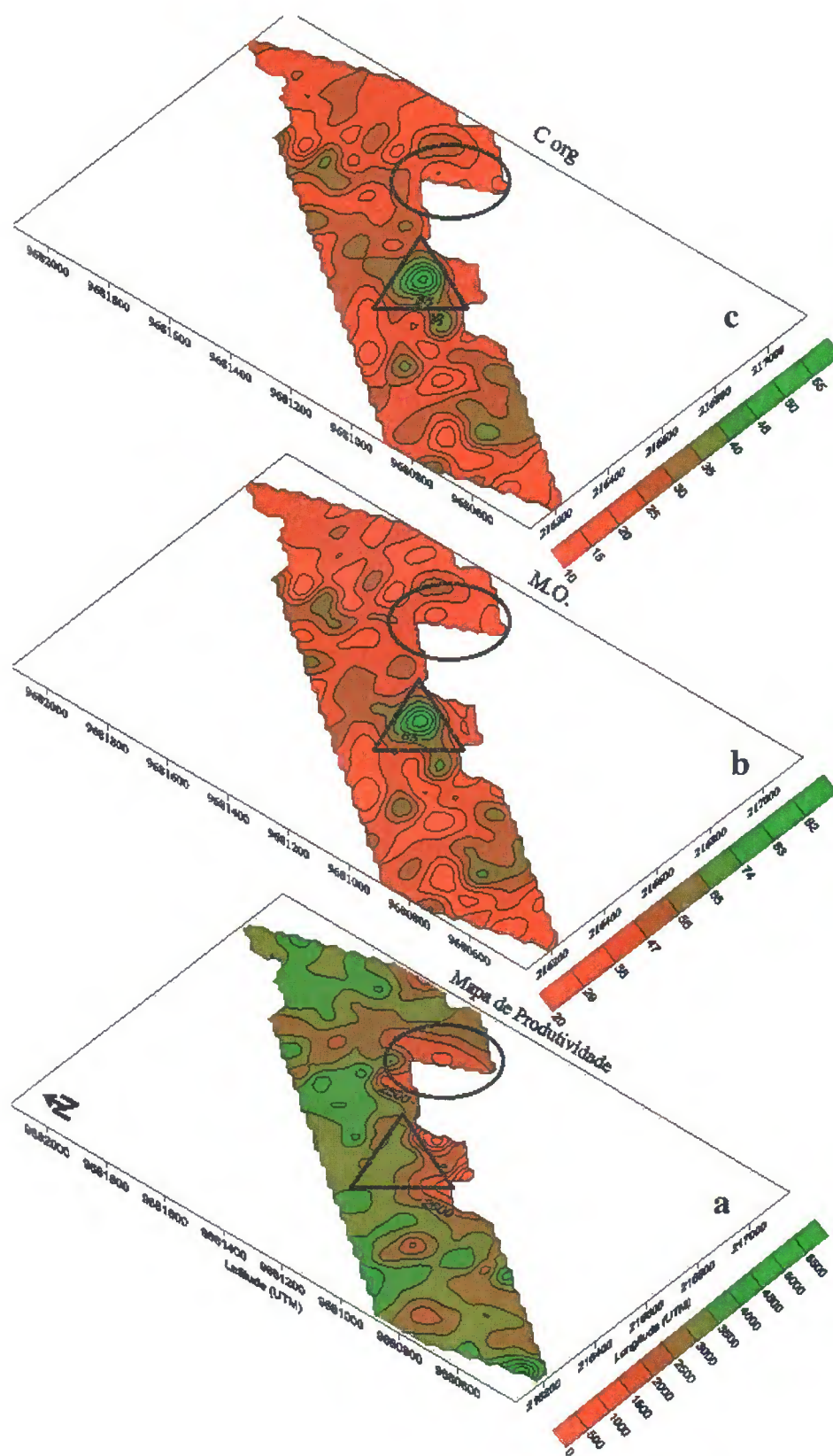


Figura 15. Mapas da distribuição espacial da produtividade, matéria orgânica (M.O.) e carbono orgânico (C org.).

O fósforo (Figura 16c) embora a ilustração do mapa tenha uma aparência de teríamos teores baixos, apresenta poucos pontos menores que 10 mg dm^{-3} , o que ajuda a justificar a boa produtividade da área como um todo, que ficou acima da média nacional (IBGE, 2013), outra informação que pode ser tirada do mapa também é a falta de uniformidade o que ocorre quando trabalhamos tratando uma área não homogênea como homogênea, onde podemos visualizar no mapa nas cores verdes quantidades bem acima dos valores médios da área. Este fato foi demonstrado com a representação dos vetores, que indicam a direção do escoamento da água da chuva.

O potássio (Figura 16b) mostra comportamento semelhante ao visto com o fósforo (Figura 16c), com uma grande variação da quantidade dentro da área, obtendo seus valores maiores e menores nos pontos onde se obteve também os maiores e menores valores do fósforo.

A Figura 16 compara o mapa de produtividade (Figura 16a) com os mapas de potássio (Figura 16b) e fósforo (Figura 16c), pode-se notar que os pontos de menor produtividade possuem valores baixos tanto de fósforo quanto de potássio (destacado com um círculo Figura 16) e pontos onde o potássio e o fósforo tiveram seus melhores resultados tivemos uma boa produtividade (destacado com triângulo Figura 16).

O cálcio e o magnésio apresentam distribuições espaciais bem descontínuas, ocorrendo os menores teores nas áreas de menor altitude (Figura 17 b e c - circuladas), provavelmente pela lixiviação de bases, visto que nesses pontos possuíam uma declividade maior e um área de mata localizada a baixo da área. Concordando com o encontrado por Mello et al.(2006), que apresentou teores mais altos de cálcio e magnésio em altitudes maiores.

A Figura 17 compara o mapa de produtividade (Figura 17a) com os mapas de magnésio (Figura 17b) e cálcio (Figura 17c), assim como nas figuras 14, 15 e 16 pode-se notar que os pontos de menor produtividade possuem valores baixos tanto de magnésio quanto de cálcio (destacado com um círculo Figura 17) e pontos onde o magnésio e o cálcio tiveram seus melhores resultados tivemos uma boa produtividade (destacado com retângulo e quadrado na Figura 17).

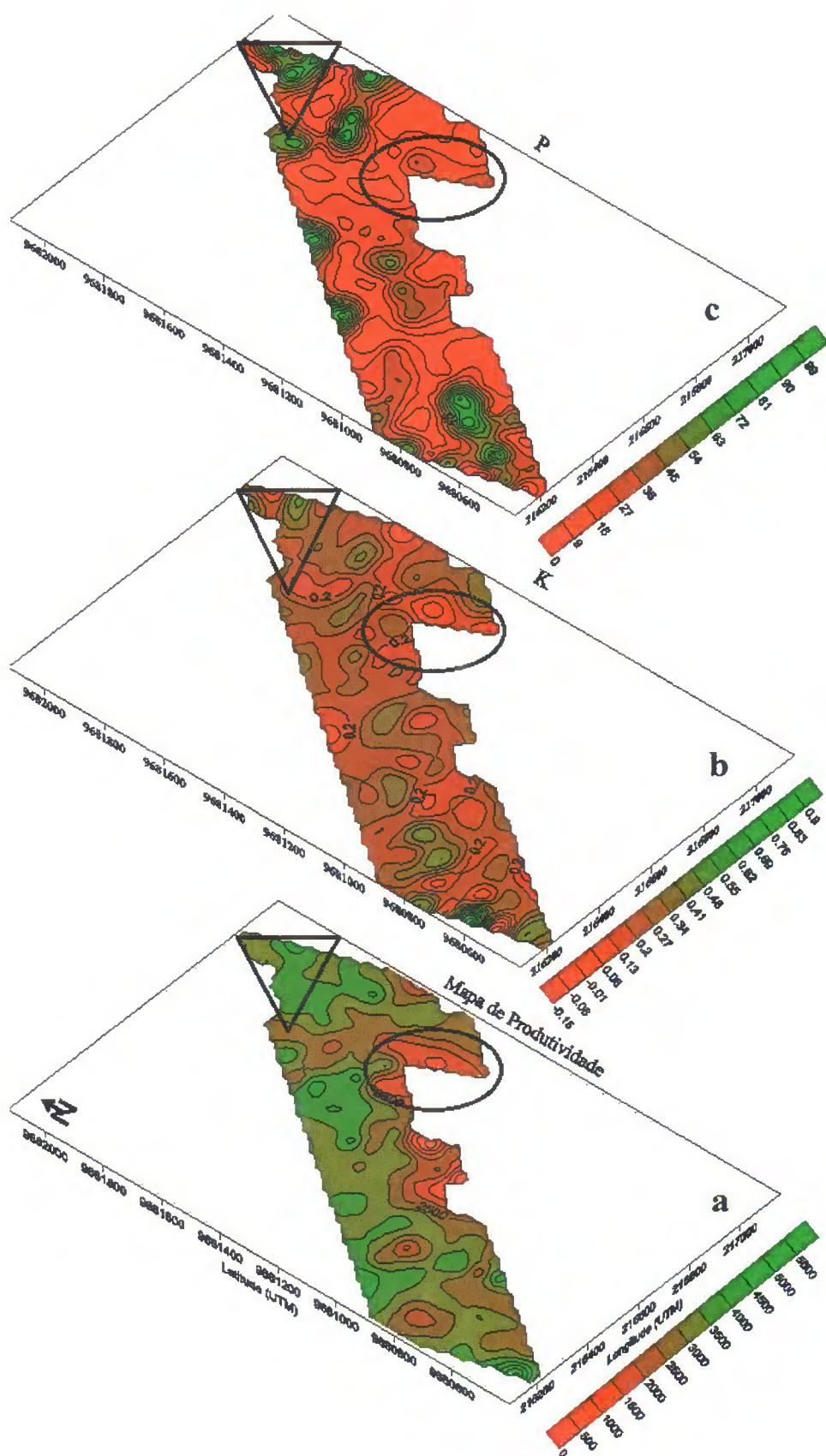


Figura 16. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), potássio (b) e fósforo (c).

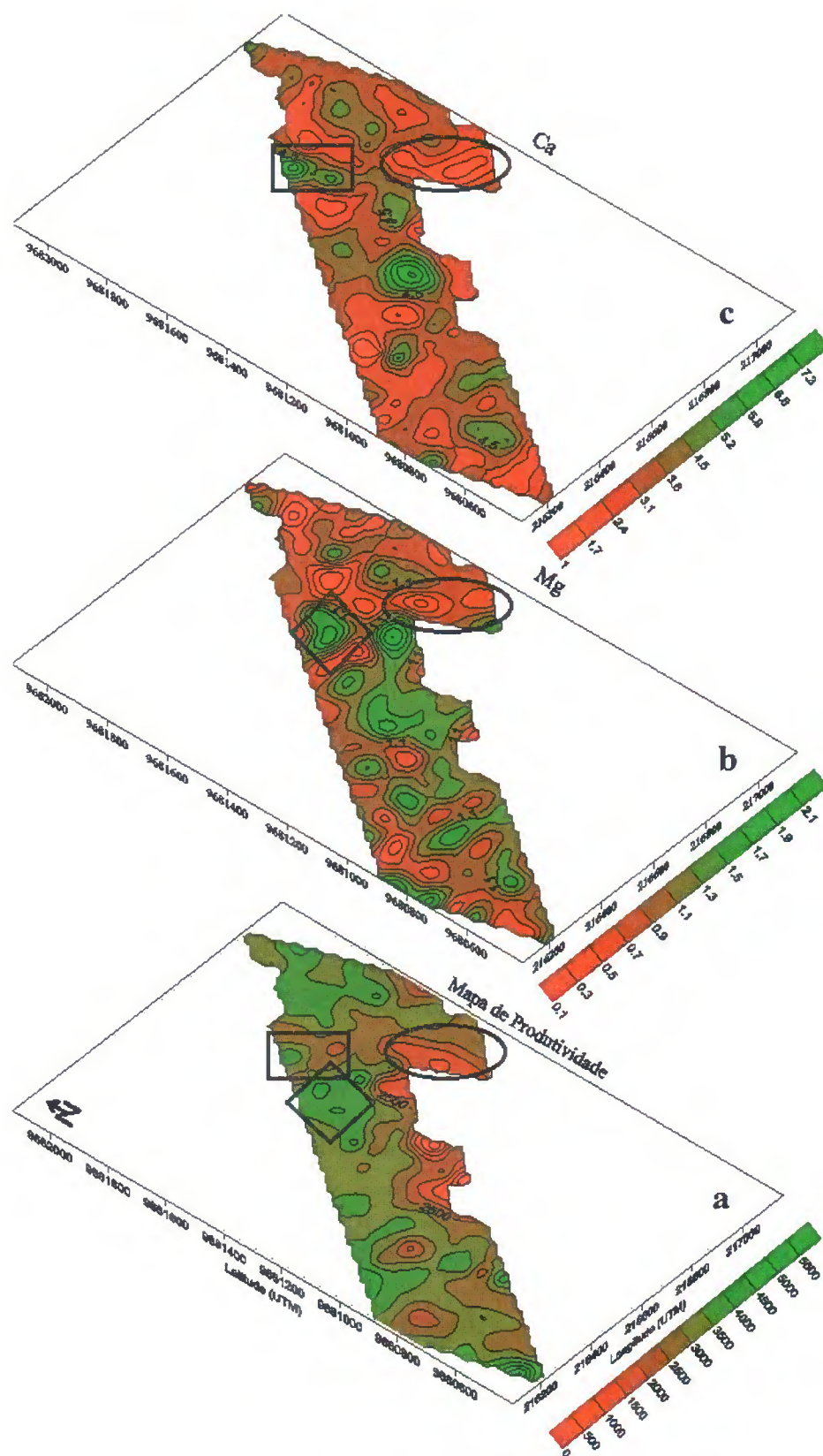


Figura 17. Mapas da distribuição espacial da produtividade (a), magnésio (b) e cálcio (c).

5- CONCLUSÕES

1. Apenas 1,33% da área não obteve produção;
2. A produtividade média foi de 3.093 kg ha⁻¹, acima da media nacional 2.937 (IBGE, 2013);
3. A área estudada apresenta solo de textura predominantemente argilosa com valores médios da Ds iguais a 1,09 g cm⁻³. A média dos valores de RP igual a 1,66 MPa;
4. O coeficiente de variação (CV) para Ds apresentou uma baixa variabilidade segundo classificação proposta por Gomes (2000);
5. A resistência a penetração (RP) média foi igual a 1,66 Mpa;
6. A área estudada apresenta solo de textura predominantemente argilosa com valores médios da Ds iguais a 1,37 g cm⁻³. A média dos valores de RP igual a 1,84 MPa;
7. As variáveis químicas do pH (água e KCl), apresentaram CV médios e muito alto para as outras P, K, Ca, Mg, Al, e para a acidez potencial;
8. A uma alta variabilidade na área estudada no que diz respeito aos números da produtividade, com a produção variando de 0,00 a 5808 kg ha⁻¹ de soja, cujo a média de produtividade foi de 3093 kg ha⁻¹. Representando apenas 43% do potencial total da área. Da produtividade total, aproximadamente 52% é representada por plantas com produção superior a media da área;
9. A análise geoestatística, efetuada por meio do semivariograma, demonstrou que as variáveis pH H₂O, pH KCl, C orgânico, matéria orgânica, potássio, magnésio e acidez potencial, ajustaram-se ao modelo Gaussiano;
10. As variáveis densidade e resistência à penetração do solo se ajustaram ao modelo aleatório, onde não pode se estabelecer dependência;
11. A humidade na capacidade de campo se ajustou ao modelo exponencial;
12. O fósforo e o alumínio se ajustaram ao modelo linear e cálcio e a produtividade se ajustaram ao modelo esférico;
13. A utilização da geoestatística se mostrou satisfatória tanto para demonstrar a variabilidade espacial bem como mapear o talhão, sendo de fundamental importância para a agricultura de precisão no que tange a cultura da soja;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. 2008.151 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP.
- ARAÚJO, J. C.; MOLIN, J. P.; VETTORAZZI, C. A. Uso de fotografias aéreas coloridas 35mm na avaliação de produtividade de grãos. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v.24, n.3, set./dez., 2004.
- ARVUS Tecnologia. **Agricultura de precisão: conceitos.** Florianópolis, 2007 Disponível em: http://www.arvus.com.br/infos_AP.htm. Acesso em jul. 2013.
- BALASTREIRE, L. A.; ELIAS, A. I.; AMARAL, J. R. Agricultura de Precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.8, n.1, p.97-111, 1997.
- BARBIERI, D.M. ; SOUZA, Z.M. ; MARQUES JÚNIOR, J.; CORÁ, J. E. ; PEREIRA, G. T. ; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de fósforo, potássio e soma de bases em um latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar na região de Jaboticabal, SP. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25.; IX REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 9.; VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 4., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 2002. p. 28.
- BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O' SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E. Soil and environmental analysis: Physical methods. 2.ed. Edinburgh, Marcel Dekker, 2001. p.377-403.
- BERGMANN, W. Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis. 2. ed. New York: Gustav Fischer Publishing House Jena, 1992. 741 p.
- BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, 2007.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.38, n.7, p.849-856, jul. 2003.

- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FREDDI, O. S.; SOUZA NETO, E. L.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agricola**, v.64, n.6, p.608-615, nov/dez, 2007.
- BHATII, A.U.; MULLA, D. J.; FPRIER, 8.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. *Rem. Senso Envir.*, S1. Paul, v. 37, p.181-191, 1991.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNAD/LANARV, 1980. 188p.
- BRUSCO, J.; SOUZA; E. G.; RODRIGUES JUNIOR, F. A.; JOHANN, J. A; PEREIRA, J. O. **Mapas de lucratividade da soja em sistema de cultivo agricultura de precisão e cultivo convencional**. 3º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão 16 a 18 de agosto de 2005 - Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas, MG.
- CÂMARA, G. M. S. Origem, difusão geográfica e importância da soja. In: Soja: tecnologia da produção. Piracicaba: Publique, 1998.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.
- CAMELO, L.G.L. et al. Variabilidade espacial de fósforo en suelo y planta en un Argiudol Tipico bajo cultivo de maiz. **R. Fac. Agron.**, v.14, p.1-8, 1993.
- CAPELLI, N. L. Agricultura de precisão – Novas tecnologias para o processo produtivo. Disponível em: <<http://wwwbases.cnptia.embrapa.br>>. 2004.
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, ago. 2002.
- CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, C. A.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, v.37, n.002, 2007.
- CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v.40, p.211-218, 2009.

- COLAÇO, A. F., CARLOS, E. F., MOLIN, J. P., ALVES, W. J. Mapeamento de produtividade, fertilidade do solo, e falhas causadas por HLB e Declínio em pomar comercial de citros. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – Conbap, Piracicaba-SP, 2008.
- COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja- trigo em sistema de plantio direto.** 2000. 146p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- DAMPNEY, P. M. R.; MOORE, M. Precision agriculture in England: Current practice and research-based advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. Proceedings ... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.661-673.
- DAVIS, G.; CASADY, W.; MASSEY, R. **Precision agriculture: an introduction.** Water quality. University of Missouri-System, 1998. p.8. Disponível em: <<http://www.fse.missouri.edu/mpac/pubs/wq0450.pdf>>. Acesso em 17 jun. 2011.
- DEON, M. D. Crescimento e nutrição da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.
- DEON, M. D. Crescimento e nutrição da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3, p.201–214, 2004.
- DOBERMANN, A.; GEORGE, T. Field-scale soil fertility variability in acid tropical soils. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., 1994, Acapulco. **Transactions.** Acapulco, 1994. v.5. p. 610-627.
- EMBRAPA SOJA. Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil. Ata da XXVIII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2006.249p.
- EMBRAPA SOJA. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2003. Londrina: Embrapa Soja, 2003. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/html/sistemasdeproducao/importancia.htm#>. Acessado em: 08 abril, 2013.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos e análises de solos.** Rio de Janeiro, 1997.

- EPSTEIN; E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants. Principles and perspectives**. Ed. 2. Sunderland: Sinauer, 2005, 225 p.
- FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. **Fertility Research**, v.45, p.91-100, 1996.
- FARIAS, P.R.S.; NOCITI, L.A.S.; BARBOSA, J.C.; PERECIN, D. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares de cítricos usando geoestatística. *Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal*, v.25, n. 2, p.235-241, 2003.
- FOCHT. D.; ROLOFF, G.; SCHIEBELBEIN, L. M.. Benefícios agronômicos, ambientais e monetários do uso da agricultura de precisão em diferentes cenários brasileiros. In CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 8p.,2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2004.
- GIOTTO, E.; SULZBACH, L.; ANTUNES, M. U. F. Evolução Temporal da Produtividade de uma Lavoura de Soja - Estudo de Caso. **Geomática**, Santa Maria, v.1, n.1, 2006.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. (Golden, Estados Unidos). SURFER for windows: realese 8.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide. New York: 2002. 714p.
- GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-1157, 2001.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-1157, 2001.
- GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. *Informações Agronômicas* nº 95, setembro, 2001.
- GUERRA. P. A. G. Geoestatística operacional. Ministério das Minas e Energia, 1988, 145p.
- GUIMARÃES, R. S. Volume de contratos futuros de soja negociados na Bolsa de Mercadorias & Futuros (BM&F). Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- HARTWIG, E. E.; KIIHL, R. A. S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybean for short-day conditions. **Field Crops Reseach**, Amsterdam, v. 2, p.145-151, 1979.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE). 2º Levantamento sistemático da produção agrícola, 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. *Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy*, Johannesburg, v.52, p.119-139, 1951.
- LAMPARELLI, R.A.C., ROCHA, J.V., BORGHI, E. Geoprocessamento e Agricultura de Precisão. Ed. Agropecuária, 2001, 118p.
- LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. Exploratory analysis of yield maps of combine crops, In: European Conference On Precision Agriculture, 1, 1997. *Precision Agriculture 97*, v.1, Warwick, 1997, p.887-894.
- LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.4, p.1166-1169, jul-ago, 2007.
- MALZER R.B.; KUMARAGAMAGE, D. Variability of soil properties in a tropical alfisol used for shifting cultivation. *Soil Technology*, Amsterdam, v.9, p.187-197, 1996.
- MANZATTO, C.V.; BHERING, S.B.; SIMÕES, M. **Agricultura de Precisão: Propostas e ações da EMBRAPA Solos**. EMBRAPA Solos, 1999. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>. Acesso em: 01 out. 2011.
- MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.2, p.294-305, 2006.
- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.6, p.1149-1159, nov./dez. 2003.
- MISSÃO, M. R. SOJA: origem, classificação, utilização e uma visão abrangente do mercado. *Maringá Management: Revista de Ciências Empresariais*, v.3, n.1, p.7-15, jan./jun, 2006.
- MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte II: Diagnostico, Aplicação Localizada e Considerações econômicas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, V.17, n.2, p.108-121, Dez.1997b.
- MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Revista Engenharia Agrícola*. v.22, n.1, p.83-92, jan, 2002.

- MOLIN, J. P.; MILAN, M.; NESRALLAH, M. G. T.; CASTRO, C. N.; GIMENEZ, L. M. Utilização de dados georreferenciados na determinação de parâmetros de desempenho em colheita mecanizada. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.3, Jaboticabal, set./dez, 2006.
- MOLIN, J.P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para a agricultura de precisão. In: BORÉM, A.B. *et al.* **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 237-258.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; KUNKEL, R. Methods for removing spatial variability from field research trials. *Adv. Soil Sei.*, New York, v. 13, p.201-213, 1990.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista de Ciências Exatas Naturais**, v.6, p.97-111, 2004.
- NOVAIS, F. R.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999, 399p.
- OLIVEIRA, M. L. ; MACEDO. M. A .R; MARQUES, D. C. S. ; COSTA, M. G; SANTOS, M. A.S. **Fontes de crescimento da produção de laranja na microrregião do Guamá no período de 2001-2009**. In: Anais do 9º Seminário Anual de Iniciação Científica, 2011, Belém.
- PETTER, R. L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado em Biodinâmica do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.
- PIRES, J. L. F.; CUNHA, G. R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. **Discutindo agricultura de precisão – aspectos gerais**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 18 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online; 42). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm.
- QUEIROZ, D.M de.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A. et al. (Ed.), **Agricultura de Precisão**. Viçosa:UFV, 2000. p.1-42.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronomia Ceres, 1991. p164-165, 1991.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In:CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M.; CERETTA, C.A., eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001, p.114-133.
- ROCHA, J.V., LAMPARELLI, R.A.C. Geoprocessamento. In: **Mecanização e agricultura de precisão**, Lavras-MG: UFLA/SBEA, 1998, p.1-30.
- ROCHA, J.V., LAMPARELLI, R.A.C. Geoprocessamento. In: **Mecanização e agricultura de precisão**, Lavras-MG: UFLA/SBEA, 1998, p.1-30.

- ROSA FILHO, G.; PASSOS E CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F.S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.283-293, 2009.
- SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, p.1369-1377, 2008.
- SHUELLER, J.K.; WHTNEY, J.D.;WHEATON, T.A ; MILLER, W.M.; TURNER, A.E. Low-cost automatic yield mapping inhand-harvestes citrus. **Computer and Eletronic in Agriculture**, New York, v 23, p. 145-153, 1999.
- SILVA, E. A. Et al. Perspectivas no manejo e controle localizado de doenças das culturas: Uma abordagem no manejo do nematóide de cisto da soja. In: BORÉM, A. et al. (Org.) **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 409-453.
- SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, nov./dez.2003.
- SMALING, E. M. A.; ROSCOE, R.; LESSCHEN, J. P.; BOUWMAN, A. F.; COMUNELLO, E. From forest to waste: Assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as a marker. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.128, n.3, p.185–197, 2008.
- SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 2004. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SULZBACH, L. Tecnologia de agricultura de precisão: estudo de caso: integração de modelos digitais de atributos químicos do solo e modelos digitais de culturas agrícolas, Santa Maria, RS. 2003.168f Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.

- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.301-309, 1998.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, Madison, v. 38, p 45-94, 1985.
- VANNI, S.M. Modelos de regressão: Estatística aplicada. São Paulo, Legmar Informática, 1998. 177p.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, RF.; ALVARES, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-54.
- WAHEED, T.; BONNELL, R. B.; PRASHER, S. O.; PAULET, E. Measuring performance in precision agriculture: CART—A decision tree approach agricultural water management. p.173–185, 2006.
- WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FILHO, P. S. V. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta Scientiarum**, v.22, n.4, p.1055-1060, 2000.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Adv. Soil Sci.**, New York, v.3, p.1-70, 1985.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Statistical methods in soil and land resource survey.** Oxford: oxford University press, 1990. 316 p.