



LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**AMOSTRAGEM GEORREFERENCIADA E
APLICAÇÃO À TAXA VARIÁVEL DE
CORRETIVOS E FERTILIZANTES: DINÂMICA
DA FERTILIDADE DO SOLO EM LAVOURAS DE
GRÃOS NO CERRADO**

**LAVRAS – MG
2014**

LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**AMOSTRAGEM GEORREFERENCIADA E APLICAÇÃO À TAXA
VARIÁVEL DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES: DINÂMICA DA
FERTILIDADE DO SOLO EM LAVOURAS DE GRÃOS NO CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Álvaro Vilela de Resende

Coorientador

Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado

**LAVRAS – MG
2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e Serviços
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Wilda, Luana Rafaela Maciel.

Amostragem georreferenciada e aplicação à taxa variável de corretivos e fertilizantes: dinâmica da fertilidade do solo em lavouras de grãos no cerrado / Luana Rafaela Maciel Wilda. – Lavras : UFLA, 2014.

84 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Álvaro Vilela de Resende.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Variabilidade espacial. 3. Culturas anuais. 4. Fertilidade do solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.42

LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**AMOSTRAGEM GEORREFERENCIADA E APLICAÇÃO À TAXA
VARIÁVEL DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES: DINÂMICA DA
FERTILIDADE DO SOLO EM LAVOURAS DE GRÃOS NO CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 11 de outubro de 2013.

Dr. Álvaro Vilela de Resende	Embrapa Milho e Sorgo/UFLA
Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado	Dupont – Pioneer Sementes
Dr. Carlos Alberto Silva	UFLA
Dr. Marcelo de Oliveira Silva	UFLA



Dr. Álvaro Vilela de Resende
Orientador

**LAVRAS – MG
2013**

À Deus, anjos de luz e todo plano espiritual,

Dedico

Raça e Fé!

AGRADECIMENTOS

À Deus, todo plano espiritual e ao anjo guardião pela proteção, força, luz e bênçãos.

Aos meus pais e irmãos, pela torcida e apoio.

À Jéssica Maciel Millard, pelo carinho e incentivo.

À Laíze Aparecida Ferreira Vilela e Eduardo Lopes Cancellier pelo companheirismo e amizade.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela oportunidade de realização deste trabalho vinculado ao seu programa de pesquisa.

À CAPES, CNPq e Fapemig, pela concessão da bolsa de estudos e apoio na realização do trabalho de pesquisa no âmbito do projeto “Caracterização, monitoramento e manejo da variabilidade espaço-temporal em sistemas de culturas anuais”.

Ao Dr. Álvaro Vilela de Resende pela orientação, apoio, paciência e ensinamentos que foram determinantes na realização deste trabalho e no meu ingresso na pós-graduação.

Ao Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado, pela coorientação e auxílio na execução deste trabalho de pesquisa.

À Empresa CAMPO – Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental nas pessoas de Thiago Ferreira Cunha, Dr. Geraldo Jânio de Oliveira Lima pela cessão dos dados de agricultura de precisão e apoio para a execução deste trabalho.

Aos professores do DCS da UFLA, pelos ensinamentos e sabedoria transmitida.

À Dirce pela atenção, auxílio e carinho.

Aos meus amigos do DCS -UFLA, das UFSJ, UNIFEMM e Embrapa Milho e Sorgo pela companhia, aprendizado e torcida.

Ao Marcelo Linon e Sérgio Henrique Godinho Silva, pelo auxílio e apoio na execução deste trabalho.

À todas as pessoas que passaram pela minha vida e que me ajudaram a construir essa história.

RESUMO

O uso de amostragens georreferenciadas para mapeamento da fertilidade do solo e aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável tem constituído uma das principais aplicações da agricultura de precisão (AP) na produção de grãos no Brasil. Contudo, ainda há necessidade de confirmação de benefícios e validação dos métodos utilizados. Assim, objetivou-se aferir, por meio de um diagnóstico em escala de lavoura, a efetividade das práticas de amostragem georreferenciada do solo e de aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável, enfocando os efeitos na homogeneidade e estabilidade de atributos da fertilidade do solo e aspectos econômicos. Foram estudados dois talhões (A e B) destinados à produção de soja e milho numa fazenda da região noroeste de Minas Gerais, os quais vinham sendo manejados com agricultura de precisão. Utilizaram-se dados de análises de solo dos atributos fósforo, potássio, pH em CaCl_2 e saturação por bases, da camada de 0 a 20 cm de profundidade, oriundos de amostragem em grade regular com quadrículas de 2 hectares. Tais atributos estavam associados à definição de aplicações à taxa variável de calcário, gesso agrícola, fosfato monoamônico e cloreto de potássio pela empresa CAMPO, nos anos 2009 e 2012 no talhão A e 2005, 2008 e 2011 no talhão B. Foram utilizados também os dados de monitoramento da produtividade de grãos nos talhões, na safra 2012/2013. Os dados de cada talhão foram reprocessados por meio de análises descritivas, análise geoestatística e geração de mapas interpolados buscando-se identificar padrões de evolução da fertilidade do solo em resposta ao manejo com AP. Também foi realizada uma análise econômica comparativa dos gastos com insumos aplicados à taxa variável ou em dose média fixa. Os atributos de fertilidade do solo nos talhões estudados apresentam padrões de variação espacial e temporal pouco relacionados ao manejo com aplicações de corretivos e fertilizantes à taxa variável. Essas aplicações modificam o *status* de fertilidade do solo, sem evidente homogeneização e estabilização dos atributos químicos em curto prazo. A economia no gasto de corretivos e fertilizantes com o manejo à taxa variável depende da condição de cada solo ao longo do tempo e nem sempre ocorre. O uso da agricultura de precisão propiciou vantagem econômica em um dos dois talhões monitorados.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Variabilidade espacial. Manejo sítio-específico. Amostragem de solo. Adubação.

ABSTRACT

The use of georeferenced sampling for mapping soil fertility and the application of correctives and fertilizers at a variable rate has constituted one of the main applications of precision agriculture (PA) in the production of grain in Brazil. However, there is still the need to confirm the benefits and validation of the methods used. Thus, we aimed at measuring, by means of tillage scale diagnostics, the effectiveness of soil georeferenced sampling practices and the application of correctives and fertilizers at a variable rate, focusing on the effects over homogeneity and stability of soil fertility attributes and economic aspects. Two stands (A and B), destined to the production of soybeans and maize on a farm in the northwestern region of Minas Gerais, Brazil, which have been managed with precision agriculture, were studied. We used soil analysis data of the attributes: phosphorus, potassium, pH in CaCl₂ and base saturation on the layers of 0 to 20 cm of depth, derived from regular grid sampling with 2 ha boxes. Such attributes were associated with the definition of application at a variable rate of limestone, agricultural gypsum, monoamonic phosphate and potassium chloride from the CAMPO company, in the years of 2009 and 2012 in stand A, and 2005, 2008 and 2011 in stand B. We also used monitoring data from grain productivity in the stands, from the 2012/2013 harvest. The data from each stand were reprocessed by means of descriptive analysis, geostatistical analysis and generating interpolated maps, seeking to identify evolution patterns of soil fertility in response to the management with PA. An economic comparative analysis was also conducted of the expenditures with inputs applied to the variable rate or at a fixed average dose. The soil fertility attributes in the studied stands presented spatial and temporal variation patterns little related to the management with applications of correctives and fertilizers at a variable rate. These applications modify the status of soil fertility without evident homogenization and stabilization of the chemical attributes at short term. The economy in the expenditure of correctives and fertilizers with management at a variable rate depends on the condition of each soil over time, and does not always occur. The use of precision agriculture propitiated an economic advantage in one of the monitored stands.

Keywords: Precision agriculture. Spatial variability. Site-specific management. Soil sampling. Fertilizing.

LISTA DE ABREVIATURAS

Al ³⁺	Cátion alumínio trivalente
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Esf	Esférico
Exp	Exponencial
Gaus	Gaussiano
H ⁺	Cátion hidrogênio
K	Potássio
MgO	Óxido de magnésio
Mod	Moderado
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
S	Enxofre
V%	Saturação por bases em porcentagem

LISTA DE SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
AS	Média dos Erros Padronizados
ASE	Média da Variância dos Erros Padronizados
CAMPO	Empresa Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental
CV%	Coefficiente de Variação em porcentagem
EPP	Efeito Pepita Puro
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IDE	Índice de Dependência Espacial
MAP	Fosfato Monoamônico
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
RMS	Raiz Quadrada da Média do Erro ao Quadrado
RMSS	Raiz Quadrada da Média dos Erros Padronizados ao Quadrado
SIG	Sistema de Informação Geográfica
A	Talhão A
B	Talhão B
VRT	Tecnologia de Aplicação à Taxa Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Alcance
C_0	Efeito pepita
C_0+C_1	Patamar
C_1	Contribuição
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
cm	Centímetros
$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	Centimol por decímetro cúbico
$\gamma^*(h)$	Número de pares de valores medidos
h	Vetor distância
ha	Hectare
Kg ha^{-1}	Quilos por hectare
mg dm^{-3}	Milígrama por decímetro cúbico
n	Número de amostras
t	Toneladas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Semivariogramas dos atributos do solo, pH em CaCl ₂ , K ⁺ , V% e P do talhão A nos anos de 2009 e 2012. Modelo (Efeito Pepita, Contribuição; Alcance).....	47
Figura 2	Semivariogramas dos atributos do solo, pH em CaCl ₂ , K ⁺ e V% do talhão A nos anos de 2005, 2008 e 2011. Modelo (Efeito Pepita; Contribuição; Alcance).....	48
Figura 3	Semivariogramas para produtividade de grãos em toneladas, de soja no talhão A e milho no talhão B, na safra 2012/2013. Modelo (Efeito Pepita; Contribuição; Alcance).....	49
Figura 4	Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	53
Figura 5	Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão A, no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	54
Figura 6	Mapas diagnóstico do pH do solo, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2).....	55
Figura 7	Mapas diagnóstico da saturação por bases, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos	56

	anos 2009 (1) e 2012 (2).....	
Figura 8	Mapa diagnóstico do K (1) e mapa de prescrição da necessidade de KCl (2), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	57
Figura 9	Mapa diagnóstico do K (1) e mapa de prescrição da necessidade de KCl (3), referentes ao talhão A no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	58
Figura 10	Mapas diagnóstico do K, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2).....	59
Figura 11	Mapa diagnóstico do P (1) e mapa de prescrição da necessidade de MAP (2), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	60
Figura 12	Mapa diagnóstico do P (1) e mapa de prescrição da necessidade de MAP (2), referentes ao talhão A, no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	61
Figura 13	Mapas diagnóstico do P, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2).....	62
Figura 14	Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2005. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	63

Figura 15	Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2008. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	64
Figura 16	Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2011. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO.....	65
Figura 17	Mapas diagnóstico do pH, referente ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3).....	66
Figura 18	Mapas diagnóstico da saturação por bases, referentes ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3).....	67
Figura 19	Mapas diagnóstico do K, referentes ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3).....	68
Figura 20	Mapas de prescrição de gesso agrícola para os talhões A em 2012 (1) e no talhão B em 2011 (2).....	69
Figura 21	Mapa de produtividade de grãos de soja em t ha ⁻¹ no talhão A e milho t ha ⁻¹ no talhão B, na safra 2012/2013.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Descrição dos talhões estudados.....	26
Tabela 2	Prescrição de corretivos e fertilizantes à taxa variável (kg ha ⁻¹) no talhão A ¹	28
Tabela 3	Prescrição de corretivos e fertilizantes a taxa variável (kg ha ⁻¹) no talhão B ¹	29
Tabela 4	Classes de interpretação de análise para solos da região do Cerrado, na camada de 0 - 20 cm ¹	31
Tabela 5	Estatística descritiva dos dados de atributos químicos do solo no talhão A e distribuição de frequência conforme as classes de interpretação agronômica.....	38
Tabela 6	Estatística descritiva dos dados de atributos químicos do solo no talhão B e distribuição de frequência conforme as classes de interpretação agronômica.....	39
Tabela 7	Estatística descritiva dos dados de produtividade dos grãos de soja e milho nos talhões A e B.....	40
Tabela 8	Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os atributos do solo no talhão A.....	44
Tabela 9	Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os atributos do solo no talhão B.....	45
Tabela 10	Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para produtividade de grãos de soja e de milho nos talhões A e B.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo no Brasil.....	19
2.2	Aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável e necessidade de confirmação dos benefícios.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Obtenção dos dados.....	25
3.2	Descrição das áreas avaliadas.....	26
3.3	Histórico de manejo de culturas e de solo.....	27
3.4	Prescrição de insumos agrícolas à taxa variável.....	27
3.5	Processamento de dados para estudo da evolução da fertilidade do solo manejado com agricultura de precisão	30
3.5.1	Análise geostatística.....	31
3.5.2	Programas computacionais utilizados.....	33
3.6	Avaliação econômica.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	Padrão temporal das análises descritivas.....	34
4.2	Análise espacial.....	41
4.3	Evolução da fertilidade dos talhões em função do manejo à taxa variável.....	50
4.4	Padrões de produtividade das culturas de soja e milho em talhões com manejo à taxa variável da fertilidade do solo.....	70
4.5	Avaliação econômica das aplicações à taxa variável.....	73
5	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

O uso de corretivos e fertilizantes pode ser racionalizado através do conhecimento sobre a variabilidade espaço-temporal da fertilidade do solo nas lavouras. Para tal, tem-se realizado o manejo localizado por meio da agricultura de precisão (AP).

A AP é um conjunto de tecnologias que visa o aumento de eficiência, através do gerenciamento localizado da agricultura (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001). Dessa forma, a AP busca otimizar a produção, assegurar a preservação dos recursos naturais (RAGAGNIN; SENA JUNIOR; SILVEIRA NETO, 2010) e a qualidade dos produtos agrícolas, em função do manejo localizado de insumos (MOLIN, 2001).

A fertilidade do solo manejada por agricultura de precisão no Brasil tem como principais procedimentos de intervenção a amostragem georreferenciada do solo e a aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes à taxa variável. As etapas envolvidas vão desde a coleta do solo até a verificação e monitoramento dos resultados obtidos com o manejo localizado, passando pelo processamento dos dados por meio de programas de geoestatística e de geoprocessamento.

A identificação da presença de variabilidade espacial de atributos do solo pode ser estimada a partir de valores em pontos não amostrados e posterior geração de mapas, por meio da interpolação por krigagem. Esse procedimento se baseia na obtenção de informações geradas a partir dos semivariogramas. Os mapas são partes fundamentais da agricultura de precisão, pois eles são utilizados com a finalidade de buscar informações mais precisas sobre o manejo agrícola a ser aplicado.

A aplicação à taxa variável de corretivos e fertilizantes visa reduzir os riscos de aplicação inadequada de insumos, em quantidades super ou subdimensionadas, resultando em um manejo da fertilidade do solo mais

detalhado, de acordo com as variações que ocorrem dentro dos talhões de cultivo, sem gerar perdas em produtividade.

Apesar da grande aceitação dessa tecnologia no mercado agrícola brasileiro, ainda há necessidade de aferição de sua efetividade técnica e econômica em diferentes ambientes e sistemas de produção. Para tal, são necessários estudos científicos específicos, para que se obtenha maior confiabilidade na adoção das práticas de AP.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é aferir, por meio de um diagnóstico em escala de lavoura, a efetividade das práticas de amostragem georreferenciada do solo e de aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável no desempenho de áreas de cultivo de grãos na região do Cerrado, enfocando aspectos relativos à homogeneidade e estabilidade de atributos da fertilidade do solo e aspectos econômicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo no Brasil

A agricultura pode ser considerada uma atividade extremamente dinâmica em virtude da variabilidade dos fatores que se combinam para resultar na produtividade das culturas (EARL et al., 2003). Diante disso, o conhecimento da distribuição espacial e temporal destas variáveis, através da agricultura de precisão (AP), tornou-se uma importante ferramenta de gestão de práticas agrícolas (MOLIN, 2001).

A AP apresenta-se como um conjunto de tecnologias capaz de tornar eficiente o manejo agrícola pela abordagem de intervenções sítio-específicas, sendo seu principal objetivo o aumento da produção, a otimização do uso de insumos agrícolas e a redução dos riscos de contaminação de alimentos e ambiente (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001; TAYLOR et al., 2003).

A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser influenciada por fatores intrínsecos (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo) e extrínsecos, normalmente relacionados com as práticas de manejo, como adubação e calagem (CARVALHO; TAKEDA; FREDDI, 2003). Diante disso, verifica-se a heterogeneidade vertical e/ou horizontal no solo (CAVALCANTE et al., 2007).

A heterogeneidade do sistema solo é um fator que deve ser mais bem explorado, devido às implicações diretas nas intervenções agrícolas. Na agricultura ainda hoje praticada, predomina-se o manejo do solo de maneira uniforme em cada lavoura. Entretanto, um mesmo local de cultivo pode apresentar subáreas com necessidades distintas de aplicação de insumos agrícolas (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001). Mesmo em áreas consideradas uniformes visualmente, existe heterogeneidade dos atributos químicos e físicos do solo (MONTEZANO; CORAZZA; MURAOKA, 2006).

Vários trabalhos, apontam que a variabilidade relacionada aos atributos químicos e físicos do solo e também da planta, não ocorre ao acaso, apresentando uma correlação espacial ou dependência espacial (ALBUQUERQUE; REINERT; FIORIN, 1996; OLIVEIRA et al., 1999). Logo, o maior desafio é a possibilidade de manejar essa variabilidade tornando possível o gerenciamento inteligente dos talhões. Nesse contexto, a agricultura de precisão apresenta-se como uma abordagem capaz de identificar a variabilidade espacial, suas causas e as formas de tratamento (PONTELLI, 2006).

No Brasil, as primeiras iniciativas em agricultura de precisão surgiram por volta dos anos 1990. Desde então, vêm ganhando espaço como prática agrônômica, adotada por um número crescente de empresas agrícolas dedicadas à produção de culturas anuais no país.

Levantamento feito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1999) aponta que a maioria das áreas agricultáveis no Brasil está localizada na região Centro-Oeste, sobre solos classificados como Latossolos. Apesar de ocuparem uma posição de destaque no cenário agrícola, os solos de Cerrado são originalmente ácidos e de baixa fertilidade (LOPES, 1983). A obtenção de boas produtividades nesses ambientes requer gastos significativos com corretivos de acidez e fertilizantes, tanto para a construção da fertilidade inicial quanto para sua manutenção após o estabelecimento dos sistemas de cultivo.

O consumo nacional de fertilizante NPK, para o cultivo de milho e soja, aproxima-se de 17% e 40%, respectivamente, em relação ao total comercializado (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA, 2006). Nesse contexto, o uso da agricultura de precisão, visando um manejo racional de insumos, vem se tornando comum, especialmente na forma de prestação de serviços direcionados à amostragem georreferenciada de solo e aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável.

Os principais procedimentos abordados no gerenciamento da fertilidade do solo através da AP baseiam-se em quatro etapas básicas: a amostragem com obtenção da informação georreferenciada sobre o estado de fertilidade do solo ao longo do talhão de cultivo, o processamento e gerenciamento dos dados, a aplicação *in situ* dos insumos agrícolas requeridos e a avaliação dos resultados (SARAIVA; CUGNASCA; HIRAKAMA, 2000). A partir destes procedimentos, a informação obtida de maneira espacializada nas áreas de cultivo possibilita o manejo agrícola mais detalhado e o aprimoramento em busca de maior eficiência ao longo do tempo.

Na fase de amostragem do solo, é necessária a delimitação da malha ou grade amostral (*grid*) e também a definição do número de amostras a ser coletadas. Na identificação da variabilidade espacial, a amostragem em grade amostral espaçada regularmente tem sido a mais utilizada (HURTADO et al., 2008; RAGAGNIN; SENA JUNIOR; SILVEIRA NETO, 2010). A amostragem de solo pode ser considerada a etapa mais crítica de todo o processo e por isso, merece maior atenção.

Na amostragem georreferenciada, os critérios para o dimensionamento da malha amostral e do número de pontos a serem coletados, ainda, não estão claramente definidos. Entretanto, esse dimensionamento implica em efeitos na qualidade da informação expressa no mapa final para diagnóstico de atributos da fertilidade do solo. Aumentando-se o tamanho das quadrículas da malha amostral e reduzindo o número de amostras a serem coletadas numa determinada área de cultivo, distorções nos mapas diagnósticos podem ocorrer (HURTADO et al., 2008; PIERCE; NOWAK, 1999; RESENDE et al., 2006). As distorções nos mapas são mais relacionadas ao local de coleta das amostras nas malhas e ao tamanho da malha do que ao método de tratamento dos dados (LUCHIARI et al., 2004).

A escolha da dimensão da malha amostral altera os custos e a acurácia na representação das propriedades do solo analisado (MONTEZANO; CORAZZA; MURAOKA, 2006). Comercialmente, no Brasil, o tamanho da malha e o número de amostras coletadas por talhão, muitas vezes, estão

atrelados ao custo operacional da agricultura de precisão e não à representatividade agronômica dos dados obtidos a partir da amostragem do solo (RESENDE et al., 2010).

Não existe um padrão quanto à definição do tamanho de quadrícula da malha amostral. Dificilmente, são efetuadas, nas propriedades agrícolas, amostragem de quadrículas com dimensões de 100 x 100 m, o que representa uma amostra de solo para cada hectare (EARL et al., 2003). De forma geral, o que se observa, são empresas prestadoras de serviço em AP no Brasil trabalhando com amostragem de solo com densidade de uma amostra a cada cinco hectares, e isso ocorre sem qualquer justificativa (NANNI et al., 2011).

Resende et al. (2006), em estudos na região do Cerrado empregando tamanho de quadrículas variando entre 0,25 e 9,0 hectares, observaram dependência espacial para os principais atributos de fertilidade do solo nas amostragens com quadrículas de até 2,25 ha, exceto o P, que somente apresentou dependência na amostragem mais densa. Já Machado et al. (2004), em trabalho desenvolvido no Paraná, utilizando uma grade de 40 x 40 m, em 13 ha, verificaram que para caracterização da variabilidade dos atributos do solo foram necessárias 14 amostras por hectare. Estes resultados experimentais comprovam que a densidade amostral é alterada conforme a área e atributos analisados. Diversos trabalhos (AMADO et al., 2009; COUTO; KLAMT, 1999) mostram que a matéria orgânica, pH, K, Ca, Mg e textura, normalmente, possuem gradiente com maior continuidade espacial em contraposição aos micronutrientes e ao P, os quais requerem uma amostragem mais densa.

2.2 Aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável e necessidade de confirmação dos benefícios

A aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável constitui a operacionalização do manejo localizado ou sítio-específico da fertilidade do solo nas áreas de produção (GODWIN et al., 2003), sendo conhecida pelo termo “*Variable Rate Technology*” (VRT). Este tipo de manejo se

fundamenta na capacidade de o tomador de decisão reconhecer níveis de heterogeneidade da produção e adequar as recomendações de fertilizantes e corretivos de solo para cada unidade diferenciada reconhecida dentro de um talhão de cultivo (URRICARIET; ZUBILLAGA, 2010). No mercado, existem controladores eletrônicos em máquinas agrícolas que permitem variar a dose de insumos com boa precisão. Estes equipamentos podem ser programados e regulados para monitorar a aplicação. Após a aplicação à taxa variável é possível fazer novas amostragens e gerar nova recomendação de aplicação de insumos para medir a eficiência do manejo sítio-específico e também comparar com o mapa de prescrição original. Entretanto, apesar de ser aplicada em larga escala, ainda, existem poucos estudos que atestam a sua eficiência.

Procedimentos de adubação e calagem, no manejo agrícola tradicional, são realizados comumente de maneira uniforme, com dose fixa em área total, estimada de acordo com a condição média de fertilidade da área a ser manejada. A variabilidade espacial e temporal, nesse caso, não é considerada. Na aplicação à taxa variável, de início, o detalhamento das informações decorrentes da amostragem em malha já se apresenta como vantagem do emprego da AP, quando comparado ao processo de amostragem convencional, em que uma amostra composta é utilizada para representar áreas de grandes dimensões. A aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável pode implicar em economia de insumos e possíveis ganhos em produtividade. Há relatos de que se gasta menos corretivos e fertilizantes com aplicações em taxa variável do que quando aplicados em dose média fixa (CAMPOS et al., 2008; SOUZA et al., 2007). Pressupõe-se que as aplicações à taxa variável permitem reduzir o risco de aplicação de quantidades super ou subestimadas, nas lavouras, sem gerar perdas em produtividade. Isso porque, a AP permite a aplicação de insumos nos locais corretos e nas quantidades requeridas (DERCON et al., 2006; MZUKU et al., 2005).

Na região dos Campos Gerais, no Paraná, Weirich Neto, Sverzut e Schimandheiro (2006), compararam a necessidade de aplicação de fertilizantes e corretivos, baseando-se na aplicação à taxa variável e fixa, em lavoura comercial sob sistema plantio direto. Os resultados desse estudo mostraram que, seguindo a recomendação tradicional (taxa fixa), as doses aplicadas seriam subestimadas para K_2O e superestimada para P_2O_5 . Entretanto, Amado et al. (2006) comparando a aplicação de fertilizantes à taxa variável e taxa fixa, em duas empresas agrícolas no Rio Grande do Sul, mostraram que, a aplicação à taxa variável de adubo promoveu uma redução no uso de fertilizante em cerca de 53%, em relação à aplicação à taxa fixa, em uma das propriedades avaliadas. Na outra empresa agrícola, o custo de aplicação de fertilizante à taxa variável foi ligeiramente superior.

Mesmo carecendo de maior respaldo científico quanto à viabilidade econômica, agrônômica e ambiental, a AP vem avançando rapidamente sobre áreas agricultáveis no país. Apesar de promissora, a AP no manejo da fertilidade do solo ainda não é uma ferramenta totalmente consolidada, necessitando de confirmação e validação dos métodos utilizados. A efetiva comprovação do desempenho agrônômico e de rentabilidade dos cultivos ao longo do tempo, frente às aplicações à taxa variável de corretivos e fertilizantes, deve constituir uma meta da AP no Brasil para os próximos anos.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo aferir, por meio de um diagnóstico em escala de lavoura, a efetividade da prática de amostragem georreferenciada do solo e de aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável, enfocando aspectos relativos à homogeneidade e estabilidade de atributos da fertilidade do solo e aspectos econômicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção dos dados

A base para a realização deste trabalho foi o repositório de dados de agricultura de precisão da empresa CAMPO - Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental, sediada em Paracatu – MG. Foram fornecidos pela empresa CAMPO, os dados de análises de solo, o histórico do manejo aplicado nas áreas avaliadas, os mapas de prescrição dos insumos agrícolas recomendados e os dados de produtividade das culturas. Dois talhões de uma propriedade agrícola da região Noroeste de Minas Gerais foram selecionados para este estudo.

Nas coletas georreferenciadas de amostras de solo realizadas pela empresa CAMPO, utilizou-se grade regular com quadrículas de 2 hectares e 10 subamostras para obtenção de uma amostra composta, na camada de profundidade de 0 a 20 cm

As determinações analíticas de rotina para avaliação da fertilidade do solo foram efetuadas conforme metodologias descritas em EMBRAPA (1997), sendo o fósforo e potássio extraídos com a solução Mehlich 1 e o pH medido em solução de cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Com base nos resultados da análise química, foi calculado o valor da percentagem de saturação por bases (V%).

Para fins do presente estudo, os atributos (P, K^+ , pH em CaCl_2 e V%) foram selecionados por estarem associados à definição das aplicações à taxa variável de insumos. Calcário, gesso agrícola, fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl) foram os insumos agrícolas aplicados no manejo das áreas. Logo, com a avaliação periódica do *status* do solo em relação a P, K, pH e V% é possível fazer inferências sobre a dinâmica da fertilidade do solo em função da adoção do manejo sítio-específico.

3.2 Descrição das áreas avaliadas

A propriedade agrícola na qual as áreas de estudo estão situadas possui lavouras destinadas à produção comercial de culturas anuais, caracterizadas pelo emprego de elevado investimento tecnológico. Nesta propriedade, foram avaliados dois talhões cujo manejo da fertilidade do solo vem sendo feito utilizando as técnicas de agricultura de precisão, com aplicação à taxa variável de corretivos e fertilizantes. Denominam-se as áreas onde ocorreu o estudo como talhões A e B. O clima da região é classificado, de acordo com Köppen, como tropical com estação seca (Aw). Os solos de ambos os talhões são classificados como Latossolo Vermelho Amarelo argiloso (Tabela 1).

Tabela 1 Descrição dos talhões estudados

Talhões	Área (ha)	Nº de amostras ¹	Tipo de Solo ²	Argila dag kg ⁻¹	Amostragem ³
A	118,30	60	LVA	61	2009 e 2012
B	118,80	60	LVA	57	2005, 2008 e 2011

¹Número de amostras compostas coletadas em grade amostral com quadrículas de 2 hectares; ²Latossolo Vermelho Amarelo argiloso; ³Períodos de coleta de amostras de solo para aplicação de agricultura de precisão.

Nos talhões A e B, foram coletadas 60 amostras nas áreas de 118,30 ha e 118,80 ha, respectivamente. Entretanto, com processamento dos dados, foram retiradas 12 amostras identificadas como *outliers* no talhão A/2009 e 4 em A/2012. No talhão B, foram excluídas 8 amostras *outliers* em 2005 e 2008 e 4 em 2011. Após essa etapa os dados foram submetidos ao geoprocessamento. Com o ajuste de bordas para padronizar os mapas gerados, as áreas efetivamente avaliadas no presente estudo foram de 87,46 ha no talhão A e 83,30 ha no talhão B.

3.3 Histórico de manejo de culturas e de solo

Os talhões vêm sendo trabalhados com rotação de culturas em sistema plantio direto, em área de sequeiro, utilizando-se a sequência soja, milho e feijão, sucessivamente, como safras de verão.

Aplicaram-se nos talhões, ao longo do tempo de adoção da agricultura de precisão, calcário, gesso, MAP e KCl à taxa variável, conforme descrito nas tabelas 2 e 3. Este procedimento foi realizado com o equipamento Nevoeiro[®], tipo cocho, sistema de distribuição tipo colmeia, modelo 10.000, com capacidade para 10.000 quilo gramas.

3.4 Prescrição de insumos agrícolas à taxa variável

O dimensionamento das aplicações à taxa variável foi definido conforme critérios adotados pela empresa CAMPO, os quais não foram os mesmos para os dois talhões em todos os anos (Tabelas 2 e 3). As informações contidas nas Tabelas 2 e 3 foram transcritas dos mapas de prescrição processados pela empresa. Os insumos foram aplicados antes da implantação das culturas nas respectivas safras, de acordo com esses mesmos mapas. O mapa de prescrição transcrito apresenta as informações sobre a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, nas quantidades exatas e necessárias em cada ponto do talhão, nos períodos avaliados.

Tabela 2 Prescrição de corretivos e fertilizantes à taxa variável (kg ha⁻¹) no talhão A1

Talhão A – 2009		
KCl²	Calcário³	MAP⁴
50-90 (31,6 ha)	500 (33,4 ha)	50-100 (33,05 ha)
90-130 (8,5 ha)	500-1000 (27,9 ha)	100-150 (20,37 ha)
130-170 (5,9 ha)	1000-1567 (5,1 ha)	150-200 (2,09 ha)
170-210 (1,3 ha)	-	-
210-250 (0,6 ha)	-	-
250-305 (0,2 ha)	-	-
Talhão A – 2012		
KCl²	Gesso Agrícola⁵	Calcário⁶
50-88 (24,7 ha)	500 (5,4 ha)	400-775 (13,7 ha)
88-159 (14,9 ha)	600 (11,0 ha)	775-1515,5 (27,3 ha)
159-247 (10,1 ha)	700 (26,4 ha)	1515-1940.1 (22,3 ha)
247-351 (11,2 ha)	800 (42,3 ha)	1940-266.1 (14,8 ha)
351-557 (6,3 ha)	-	-

¹Conforme valores expressos nos mapas processados pela empresa CAMPO. Valores entre parênteses indicam a área do talhão que recebeu aplicação do insumo na quantidade indicada no respectivo intervalo de doses. ²Cloreto de potássio aplicado quando o teor de K no solo era < 200 mgdm⁻³; ³ Calcário calcítico com CaO = 54% e PRNT = 89%, aplicado para se alcançar 45% de Ca na CTC; ⁴Fosfato monoamônico aplicado quando o teor de P no solo era < 8,0 mg dm⁻³; ⁵Gesso agrícola como fonte de enxofre, aplicado quando o teor de S no solo era < 10 mg dm⁻³; ⁶Calcário dolomítico com MgO = 19% e PRNT = 90%, aplicado para se alcançar 15% de Mg na CTC. Na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Tabela 3 Prescrição de corretivos e fertilizantes à taxa variável (kg ha⁻¹) no talhão B¹

Talhão B – 2005		
KCl²	Calcário³	Gesso Agrícola⁴
-	500 (16,7 ha)	-
-	500-1000 (20,3 ha)	-
-	1000-1500 (21,3 ha)	-
-	1500-2000 (5,8 ha)	-
-	2000-2300 (0,9 ha)	-
Talhão B – 2008		
-	400-1000 (20,4 ha)	-
-	1000-1500 (39,6 ha)	-
-	1500-2000 (14,6 ha)	-
-	2000-3000 (1,9 ha)	-
-	3000-3406 (0,3 ha)	-
Talhão B – 2011		
150-182 (39,9 ha)	400-595 (18,3 ha)	500 (18,3 ha)
182-293 (20,2 ha)	595-905 (13,6 ha)	600 (13,6 ha)
293-315 (11,3 ha)	905-1229 (16,6 ha)	700 (16,6 ha)
315-424 (7,4 ha)	1229-1588 (10,5 ha)	800 (10,5 ha)
424-527 (4,4 ha)	1588-2343 (7,4 ha)	-

¹ Conforme valores expressos nos mapas processados pela empresa CAMPO. Valores entre parênteses indicam a área do talhão que recebeu aplicação do insumo na quantidade indicada no respectivo intervalo de doses. ² Cloreto de potássio aplicado quando o teor de K no solo era < 200 mg dm⁻³; ³ Calcário calcítico com CaO = 54% e PRNT = 89%, aplicado para se alcançar 45% de Ca na CTC; ⁴ Gesso agrícola como fonte de enxofre, aplicado quando o teor de S no solo era < 10 mg dm⁻³. Na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

3.5 Processamento de dados para estudo da evolução da fertilidade do solo manejado com agricultura de precisão

A partir dos resultados de análise de solo disponibilizados pela empresa CAMPO, efetuou-se processamento dos dados, visando comparar o comportamento espacial e temporal dos atributos afetados pelo manejo com agricultura de precisão.

Conforme os preceitos para aplicação de análises estatísticas descritivas e de geoestatística, em toda a massa de dados foi aplicada análise de gráfico de Box-Whisker Plot para verificação da ocorrência de dados discrepantes ou *outliers*. Os dados discrepantes identificados foram removidos, para evitar que a modelagem da dependência espacial, representada pelo semivariograma, fosse mascarada.

Na sequência, foi executada uma verificação de tendência nos dados, nas posições espaciais.

Os dados de fertilidade do solo foram submetidos à análise de estatística descritiva determinando-se os parâmetros: valores mínimos, máximo, média, mediana, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. Para avaliação do coeficiente de variação (CV), utilizou-se a classificação de Warrick e Nielsen (1980), em que a variabilidade é considerada baixa para valores de CV% menores que 12%, média, para valores entre 12 e 60% e alta, para valores acima de 60%.

Para interpretação dos resultados da análise de solo para culturas anuais, utilizaram-se como referência as classes (Tabela 4) sugeridas por Sousa e Lobato (2004).

Tabela 4 Classes de interpretação de análise para solos da região do Cerrado, na camada de 0 - 20 cm¹

Interpretação	pH CaCl ₂	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	V%
Muito Baixo	-	0 a 3	-	-
Baixo	≤ 4,4	3,1 a 5,0	≤ 25	≤ 20
Média	4,5 a 4,8	5,1 a 8,0	26 a 50	21 a 35
Adequado	4,9 a 5,5	8,1 a 12,0	51 a 80	36 a 60
Alto	5,6 a 5,8	>12	> 80	61 a 70
Muito Alto	≥ 5,9	-	-	≥ 71

¹ Interpretação de K⁺ para solos com CTC a pH 7 igual ou maior que 4 cmol_c dm⁻³. Interpretação de P para sistemas de sequeiro, considerando o teor de argila do solo entre 36 a 60%.

Fonte: Adaptado Sousa e Lobato (2004).

3.5.1 Análise geoestatística

Após a análise exploratória dos dados, foram gerados semivariogramas com o objetivo de verificar a existência de dependência espacial para as variáveis do solo nos talhões em estudo. A dependência espacial foi avaliada através da análise geoestatística, por meio do cálculo da semivariância (VIEIRA, 1983). O processamento geoestatístico dos dados é baseado na teoria das variáveis regionalizadas. O modelo do semivariograma e seus parâmetros, conjuntamente com técnicas de interpolação de dados, foram utilizados para a obtenção de mapas temáticos dos atributos do solo.

A semivariância é estimada pela expressão (1) mostrada a seguir:

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

sendo N(h) o número de pares experimentais de observações Z(x_i) e Z(x_i + h) separados por uma distância h. O semivariograma é representado pelo gráfico $\gamma^*(h)$ versus h. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\gamma^*(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C₀; contribuição, C₁; patamar, C₀+C₁ e o alcance, a).

Como procedimento para definir o índice de dependência espacial (IDE) dos atributos do solo avaliados, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que valores de $[C_0/(C_0+C1)]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de $[C_0/(C_0+C1)]$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de $[C_0/(C_0+C1)]$ maiores que 75% determinam dependência espacial fraca.

Os dados foram ajustados, quando pertinente, aos modelos: esférico, exponencial e gaussiano. Cada um dos atributos de solo (pH em CaCl₂, K, P e V%) avaliados foram ajustados a um modelo de semivariograma.

Para a interpolação por geoestatística, foi utilizada a krigagem ordinária dos atributos químicos do solo, com base no semivariograma ajustado. Os modelos de semivariograma e seus parâmetros (efeito pepita, alcance e patamar) foram usados, com a técnica de interpolação de dados por krigagem. Utilizou-se, nesse procedimento um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

A escolha do semivariograma experimental foi realizada de acordo com os parâmetros de ajuste (média dos erros padronizados, AS; raiz quadrada da média do erro ao quadrado, RMS; média da variância dos erros padronizados, ASE e raiz quadrada da média dos erros padronizados ao quadrado, RMSS) obtidos através do programa ArcGIS[®]. Dessa forma, o melhor semivariograma será aquele que apresentar a AS próximo de 0 e RMS e ASE próximo de 1.

Os mesmos processamentos utilizados para análises descritivas e geoestatísticas dos dados de solo foram aplicados para as variáveis de produtividade de grãos de soja e milho, monitoradas nos talhões A e B na safra 2012/2013. No período da colheita, os dados de produtividade foram obtidos por meio de uma colhedora equipada com GPS e sensor de fluxo de colheita e umidade. Após a filtragem dos dados para retirada dos *outliers*, a umidade dos grãos de soja e de milho foi corrigida para 13%. Os dados assim tratados foram submetidos à análise geoestatística, com base no semivariograma ajustado, para

posterior plotagem dos mapas digitais.

3.5.2 Programas computacionais utilizados

Nas análises de estatística descritiva, foi utilizado *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011). Para as análises geoestatísticas e plotagem de mapas temáticos, trabalhou-se com o sistema de informação geográfica ArcGIS® versão 10.0.

3.6 Avaliação econômica

A título de comparação de custos das práticas de manejo da fertilidade do solo da forma tradicional ou via agricultura de precisão, foram estimados os valores gastos com insumos, de acordo com a utilização de uma dose média fixa ou aplicação à taxa variável, em cada talhão e período avaliados.

O levantamento de custos vinculados à estratégia de manejo à taxa variável baseou-se nos gastos com insumos de acordo com o que foi aplicado pela empresa CAMPO (Tabelas 2 e 3).

Para simular o que seria gasto no manejo tradicional com dose fixa por talhão, considerou-se o que seria a condição média de fertilidade nas áreas. A partir dos valores médios dos atributos de solo oriundos do conjunto de dados de análise da empresa CAMPO, aplicaram-se os mesmos critérios utilizados pela empresa para simular as quantidades de insumos que seriam aplicadas em taxa fixa para cada talhão e ano.

Nos cálculos econômicos foram consideradas as cotações em (R\$/t) dos insumos, conforme segue: 1.342,00; 1.588,00; 60,00; e 100,00 para KCl, MAP, calcário e gesso agrícola, respectivamente. Neste estudo, os custos operacionais de aplicação dos insumos foram considerados os mesmos para utilização de dose fixa ou taxa variável. Como referência monetária, informa-se que a cotação do dólar americano (US\$) à época desse levantamento era de R\$ 2,19 reais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Padrão temporal das análises descritivas

A análise exploratória dos valores encontrados para os atributos de fertilidade do solo e para a produtividade das lavouras, após a remoção dos *outliers*, é apresentada nas Tabelas 5, 6 e 7. A discussão abaixo permite apenas uma comparação com outros dados, não constituindo subsídio para inferência estatística que leva em consideração a dependência espacial. Os valores de média, máximo e mínimo fornecem a ideia da magnitude da variabilidade dos atributos do solo, porém, nada informam sobre a estrutura de dependência espacial desses atributos.

A análise descritiva dos atributos de fertilidade do solo dos talhões A (Tabela 5) e B (Tabela 6) mostra valores de média e mediana próximos para a maioria das variáveis experimentais, nos períodos avaliados. O mesmo comportamento foi observado para os dados de rendimento das culturas (Tabela 7). Quando os valores da média e mediana são semelhantes, os dados se aproximam da distribuição normal (LITTLE; HILLS, 1978). Segundo Cavalcante et al. (2007) e Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, mas é conveniente apenas que no gráfico de distribuição normal, a variável não apresente extremidades da distribuição muito alongada, o que poderia indicar a presença de dados discrepantes e assim comprometer a análise geoestatística.

Nas áreas estudadas, verificou-se também que a maioria das variáveis de solo e produtividade das culturas apresentaram valores de coeficiente de assimetria próxima de 0 e coeficiente de curtose abaixo de 3. Dessa forma, confirma-se que os dados não possuem assimetria acentuada. Segundo Cambardella et al. (1994), tal fato pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição, ou

seja, os atributos envolvidos no estudo estão se aproximando de uma distribuição normal.

Neste estudo, verificou-se que o coeficiente de variação (CV) foi baixo (<12%) para o pH em CaCl_2 e médio (12 a 60%) para P, K e V% em todos os talhões e períodos estudados. Os dados de produtividade apresentaram baixo CV para a soja (8 %) e médio para o milho (17,8%). O fósforo foi o atributo que apresentou maior coeficiente de variação (59%), com teores que variaram entre 0,4 e 39,4 mg dm^{-3} , lembrando que os dados *outliers* já havia sido removidos. O pH em CaCl_2 foi a propriedade química do solo com o menor CV (2,6%). De maneira generalizada, esta variabilidade contrastante entre os atributos P e pH em CaCl_2 foi observada em todas as amostragens, nas duas áreas estudadas.

Segundo Cambardella et al. (1994), a variabilidade dos atributos do solo pode ser de origem extrínseca ou intrínseca. A variabilidade extrínseca possui menor dependência espacial, sendo causada por alterações relacionadas a fatores alheios ao solo (ex.: adubação e calagem). Já a variabilidade intrínseca possui forte dependência espacial, sendo causada por alterações ligadas a processos inerentes ao solo (ex.: tipo de material de origem, intemperismo de minerais). Os elevados valores de CV encontrados para P ocorrem provavelmente devido a efeitos residuais de adubações anteriores feitas no sulco de semeadura (CAVALCANTE et al., 2007). Entretanto, segundo Silva et al. (2003), mesmo aplicações a lanço seguidas de revolvimento do solo podem promover variabilidade. Os resultados do presente estudo são semelhantes aos encontrados por Schlindwein e Anghioni (2000) em que o CV foi baixo para pH em água e matéria orgânica, e alto para P e K.

A grande amplitude de variação de valores de atributos como P (Tabelas 5 e 6) chama atenção para o maior risco de se usar a condição média de fertilidade do talhão como base para a tomada de decisão sobre a realização do manejo para correção da acidez e adubação. A utilização de doses médias fixas

pode fazer com que alguns locais do talhão recebam corretivos e fertilizantes em quantidades sub ou superdimensionadas, podendo acarretar limitação do potencial produtivo, efeitos negativos ao ambiente e prejuízos econômicos, devido a aplicações inadequadas desses insumos, culminando em menor eficiência da propriedade agrícola.

Na Tabela 7, nota-se que as culturas colhidas nas áreas de estudo apresentaram alto rendimento de grãos na safra 2012/2013. O milho obteve produtividade média de 13 t ha⁻¹ e a soja de 3,6 t ha⁻¹. Certamente, parte desse desempenho se deve ao elevado investimento na construção e manutenção da fertilidade do solo, conforme denotam os valores médios de pH, saturação por bases, P e K ao longo do tempo nos talhões (Tabelas 5 e 6).

A interpretação agronômica dos atributos de solo de acordo com as indicações de Sousa e Lobato (2004) encontra-se nas Tabelas 5 e 6. Comparando os valores médios dos atributos verifica-se que, na maioria dos casos, o K⁺ foi interpretado como alto, o pH em CaCl₂ e a saturação por bases como adequados e o P como médio.

Aproximadamente 99% das amostras de solo coletadas nos dois talhões apresentaram alta disponibilidade de K⁺, com teor mínimo de 62 mg dm⁻³ e máximo de 280 mg dm⁻³. O efeito residual cumulativo das adubações realizadas ao longo do tempo é o que provavelmente explica a presença de teores de K⁺ bem acima do limite de 80 mg dm⁻³, a partir da qual a disponibilidade é interpretada como alta por Sousa e Lobato (2004).

As medidas de tendência central, média e mediana, para pH em CaCl₂ foram respectivamente, 5,1 e 5,2 em A/2009 e 4,9 e 4,8 em A/2012. Já no talhão B, foram encontrados os seguintes valores de média e mediana: 5,2 em 2005, 6 e 6,1 em B/2008 e 5,3 em 2012. Considerando que solos com valores de pH entre 4,9 a 5,5 apresentam condição adequada de acidez (SOUSA; LOBATO, 2004), observa-se que, pelo menos, 70% das amostras estão inseridas nessa categoria.

A saturação por bases (V%) apresentou amplitude de variação entre 10,7 e 17%, com média e mediana de 57 e 56%, em A/2009. De forma geral, cerca de 87% das amostras enquadraram-se nas classes de valores maiores que 36% de saturação por bases, limite acima do qual as condições de acidez já não são tão prejudiciais ao desempenho produtivo das culturas. Com valores de saturação por bases acima de 50% e pH acima de 5,5, a atividade do alumínio no solo é baixa e seu potencial de toxidez às plantas é minimizado (SOUZA; LOBATO, 2004).

De acordo com os resultados de estatística descritiva apresentados, verifica-se que os talhões avaliados possuem bom padrão de fertilidade do solo e que a maior parte do complexo de troca de cátions do solo não está sendo ocupada pelos cátions ácidos (H e Al). Portanto, existe reserva de nutrientes que garante bom potencial de desenvolvimento das culturas e o estado de acidez na camada superficial do solo não representa maior impedimento ao desenvolvimento radicular das plantas, contrastando com a condição inicial de baixa fertilidade e elevada acidez (LOPES, 1983) das áreas de abertura do cerrado para exploração agrícola.

Essas alterações nos atributos químicos da camada superficial dos talhões de produção de grãos, em comparação às áreas originais da região do Cerrado, estão relacionadas ao elevado nível tecnológico agrícola aplicado pelo agricultor, com expressivo aporte de corretivos e fertilizantes ao longo do tempo de cultivo dos talhões. Dessa forma, o manejo de agricultura de precisão aplicado nessas áreas justifica-se com o objetivo de inovar na busca de maior eficiência no manejo da fertilidade do solo.

Tabela 5 Estatística descritiva dos dados de atributos químicos do solo no talhão A e distribuição de frequência conforme as classes de interpretação agrônômica

Talhão A								
Atributos do Solo								
	-----2009-----				-----2012-----			
	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³
Parâmetros da estatística descritiva								
Mínimo	4,5	126,0	46,0	0,4	4,5	62,4	34,0	3,3
Média	5,2	197,4	57,4	6,3	4,8	172,9	47,1	15,3
Mediana	5,1	194,0	56,0	5,7	4,9	178,0	48,0	15,1
Máximo	6,4	264,0	90,0	13,8	5,4	248,6	62,0	39,4
Assimetria	0,4	27,6	8,8	0,7	0,2	39,8	6,1	0,7
Curtose	1,8	-0,1	3,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1
CV (%)	7,2	14,0	15,3	48,5	4,1	23,0	13,0	59,1
Distribuição de frequência com base na interpretação agrônômica sugerida por Sousa & Lobato (2004)								
Muito Baixo	-	-	-	6	-	-	-	0
Baixo	0	0	0	33	0	0	0	10
Médio	15	0	0	37	42	0	4	20
Adequado	83	0	83	16	58	2	94	8
Alto	2	100	17	8	0	98	2	62
Muito Alto	0	-	0	-	0	-	0	-
n	48	48	48	48	56	56	56	56

n = Número de amostras de solo coletadas na grade amostral; K e P em mg dm⁻³ e Saturação por bases V% em %.

Tabela 6 Estatística descritiva dos dados de atributos químicos do solo no talhão B e distribuição de frequência conforme as classes de interpretação agrônômica

Talhão B												
Atributos do Solo												
	-----2005-----				-----2008-----				-----2011-----			
	pH CaCl ₂	K	V%	P	pH CaCl ₂	K	V%	P	pH CaCl ₂	K	V%	P
Parâmetros da estatística descritiva												
Mínimo	4,9	138,0	39,0	2,1	5,8	118,0	34,0	2,2	4,9	110,0	36,0	0,7
Média	5,2	212,2	53,1	6,7	6,0	164,5	49,2	7,8	5,3	187,2	53,6	5,5
Mediana	5,2	207,5	53,0	6,0	6,1	166,5	49,5	8,4	5,3	188,0	54,0	5,1
Máximo	5,6	280,0	68,0	14,6	6,4	199,0	60,0	15,8	6,1	270,0	74,0	12,1
Assimetria	-0,2	0,2	0,2	0,9	0,1	-0,4	-0,5	0,3	0,4	0,1	0,2	0,5
Curtose	-0,3	-0,2	-0,6	0,5	-0,7	0,0	0,2	-0,2	-0,5	0,1	-0,5	-0,4
CV%	3,0	14,0	12,4	42,1	2,6	10,6	10,7	41,7	5,5	18,7	16,9	48,8
Distribuição de frequência (%) com base na interpretação agrônômica de Sousa e Lobato (2004)												
Muito Baixo	-	-	-	4	-	-	-	9	-	-	-	15
Baixo	0	0	0	28	0	0	0	15	0	0	0	34
Médio	0	0	0	43	0	0	2	23	0	0	0	32
Adequado	2	0	85	19	0	0	98	45	70	0	77	17
Alto	98	100	15	6	7	100	0	8	25	100	18	2
Muito Alto	0	-	0	-	93	-	0	-	5	-	5	-
n	52	52	52	52	52	52	52	52	56	56	56	56

n = Número de amostras de solo coletadas na grade amostral; K e P em mg dm⁻³ e Saturação por bases V% em %.

Tabela 7 Estatística descritiva dos dados de produtividade dos grãos de soja e milho nos talhões A e B

Parâmetros	Produtividade	
	-----Safrá 2012/2013-----	
	Soja - talhão A (t ha ⁻¹)	Milho - talhão B (t ha ⁻¹)
Estatística Descritiva		
Mínimo	1,9	10,4
Média	3,6	13,0
Mediana	3,6	13,0
Máximo	5,2	15,5
Assimetria	-0,1	-0,1
Curtose	2,8	2,8
CV%	8,0	17,8
n	24.166	21.835

n = Número de amostras de solo coletadas na grade amostral.

4.2 Análise espacial

A análise estatística descritiva auxilia na identificação de dados discrepantes, entretanto maior atenção deve ser dada à verificação da existência de tendências associadas às posições espaciais.

A presença de dependência espacial foi detectada para a maioria dos atributos do solo e para a produtividade das culturas, em todos os anos (Tabelas 8 a 10), exceto para V% no talhão A/2009 e P no talhão B, para os quais foi encontrado o efeito pepita puro (EPP). O comportamento EPP indica que os dados não apresentam variabilidade espacial, expressando uma variância não explicada ou ao acaso, frequentemente causada por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectadas na escala de amostragem utilizada (VIEIRA, 2000). Nesse caso, seria necessário uma menor distância entre os pontos de amostragem para se detectar a dependência espacial.

Nas Figuras 1 a 3, estão apresentados os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais e a estimação de seus parâmetros para os atributos de solo e produtividade das culturas.

Na modelagem geoestatística dos dados de solo e produtividade, os valores dos parâmetros (AS, RMS, ASE e RMSS) indicaram um adequado ajuste dos semivariogramas gerados para a maioria dos atributos de solo e produtividade (Tabelas 8 a 10).

Os atributos do solo apresentaram diferentes alcances de dependência espacial na camada superficial. Dentre os que apresentaram dependência espacial, a maioria foi classificada com moderada dependência. A produtividade também apresentou dependência espacial moderada, com um raio de dependência espacial para a cultura da soja de 745 m e de 592 m para o milho (Tabela 10). Esses resultados corroboram os observados por Hurtado (2004), confirmando que os semivariogramas explicam moderadamente a variância dos dados experimentais relacionados à

fertilidade do solo e produtividade de grãos. Os valores extremos para o raio de dependência espacial das variáveis, foco do presente estudo, foram de 270 m para o pH CaCl₂ no talhão A e B e 1.252 m para o K no talhão B/2011.

O alcance (a) define o limite da dependência espacial. Segundo Carvalho, Silveira e Vieira (2002), o comprimento das dimensões da quadrícula de amostragem poderia equivaler à metade do alcance. O alcance de um atributo garante que todos os vizinhos, dentro de um círculo com esse raio, são tão similares que podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (MACHADO et al., 2007). Este parâmetro geoestatístico indica até onde os pontos amostrais se correlacionam entre si. Conhecendo o limite do alcance é possível então inferir não só sobre as dimensões de quadrículas para amostragens de solo, mas também sobre a homogeneização do solo nas áreas agrícolas manejadas com agricultura de precisão.

Considerando tais observações em relação ao alcance, entende-se que a uniformização das áreas pode ser constatada quando o valor do alcance de um atributo de interesse aumenta ao longo do tempo. Dessa forma, a ampliação do alcance para aquele atributo, indicaria a confirmação da expectativa de homogeneização da área pelo manejo com agricultura de precisão.

De forma geral, de acordo com os semivariogramas experimentais (Figuras 1 a 3), não é possível afirmar que existe um padrão de variabilidade espacial que comprove uma tendência de homogeneização da fertilidade das áreas em função do manejo a taxa variável, visto que os valores de alcance encontrados para os atributos do solo oscilaram para mais ou para menos, antes e após as intervenções com agricultura de precisão.

Na modelagem geoestatística a maioria dos atributos avaliados apresentou patamares bem definidos, sendo evidenciando a presença de alcance na estrutura de todos os semivariogramas, exceto para V% no talhão A (Figura1) e P no talhão B em todos os períodos avaliados.

O P apresentou dependência espacial no talhão A, entretanto, o mesmo não ocorreu no talhão B (Tabela 9). Este é um nutriente que caracteristicamente apresenta elevada variabilidade espacial a curtas distâncias (AMADO et al., 2009; COUTO; KLAMT, 1999; SANTOS et al., 2001), aspecto confirmado pelos elevados coeficientes de variação da análise estatística descritiva (Tabela 5 e 6). No talhão B, certamente seriam necessárias amostragens de mais alta densidade, em malhas de tamanho de quadrícula reduzido, para que se pudesse caracterizar adequadamente o padrão espacial de variação da disponibilidade de P.

Tabela 8 Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os atributos do solo no talhão A

	Talhão A							
	Atributos do solo							
	-----2009-----				-----2012-----			
	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³
Parâmetros de ajuste do semivariograma								
Modelo	Gaus	Esf	EPP	Gaus	Esf	Gaus	Esf	Esf
C ₀	0,06	243	-	19	0,01	746	38	42
C1	0,07	513	-	22	0,06	1.169	35	45
Alcance (m)	270	442	-	885	350	666	919	904
[C ₀ /(C ₀ +C1)]	0,46	0,32		0,46	0,14	0,38	0,51	0,48
IDE	Mod	Mod	-	Mod	Forte	Mod	Mod	Mod
RMS	0,1	20,1	-	-2,6	0,3	31,7	7,9	8,6
AS	0,0	0,0	-	-0,1	-0,0	0,0	-0,0	-0,2
RMSS	0,9	0,9	-	-1,0	1,0	1,1	0,9	1,0
ASE	0,2	21,6	-	-2,4	0,3	28,9	8,0	8,0
n	48	48	48	48	56	56	56	56

N = Número de observações da malha amostral; C₀ = Efeito Pepita; C1 = Contribuição; IDE = Índice de Dependência Espacial; RMS = Raiz quadrada da média do erro; MS = Média do erro padronizado; RMSS = Raiz quadrada da média do erro padronizado ao quadrado; ASE = Média da variância do erro padronizado; Esf = Esférico; Mod = Moderado; Gaus= Gaussiano; EPP= Efeito Pepita Puro.

Tabela 9 Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os atributos do solo no talhão B

Talhão B												
Modelagem Geoestatística												
	-----2005-----				-----2008-----				-----2011-----			
	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³	pH CaCl ₂	K mg dm ⁻³	V%	P mg dm ⁻³
Parâmetros de ajuste do semivariograma												
Modelo	Gaus	Gaus	Esf	EPP	Gaus	Gaus	Esf	EPP	Gaus	Gaus	Esf	EPP
C ₀	0,06	349	47	-	0,03	73	29	-	0,05	47	30	-
C1	0,01	500	36	-	0,01	322	36	-	0,04	1390	64	-
Alcance (m)	270	618	284	-	1018	284	939	-	577	1252	854	-
[C ₀ /(C ₀ +C1)]	0,85	0,41	0,56	-	0,75	0,18	0,45	-	0,55	0,03	0,32	-
IDE	Fraco	Mod	Mod	-	Mod	Fraco	Mod	-	Mod	Forte	Mod	-
RMS	0,1	28,1	7,8	-	0,1	17,1	5,6	-	0,2	32,7	7,7	-
AS	0,0	0,0	0,0	-	0,01	0,0	0,0	-	0,0	0,02	0,0	-
RMSS	0,9	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	-
ASE	0,1	26,6	7,6	-	0,1	16,0	5,5	-	0,2	30,3	7,4	-
n	52	52	52	52	52	52	52	52	56	56	56	56

n = Número de observações da malha amostral; C₀ = Efeito Pepita; C1 = Contribuição; IDE = Índice de Dependência Espacial; RMS = Raiz quadrada da média do erro; MS = Média do erro padronizado; RMSS = Raiz quadrada da média do erro padronizado ao quadrado; ASE = Média da variância do erro padronizado; Esf = Esférico; EPP = Efeito Pepita Puro; Gaus = Gaussiano; Mod=Moderado.

Tabela 10 Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para produtividade de grãos de soja e de milho nos talhões A e B		
Modelagem Geoestatística		
----- Safra 2012/2013 -----		
	Soja - talhão A	Milho - talhão B
Parâmetros de ajuste do semivariograma		
Modelo	Exp	Esf
C ₀	0,19	0,35
C1	0,26	0,81
Alcance (m)	745	592
[C ₀ /(C ₀ +C1)]	0,42	0,30
IDE	Mod	Mod
RMS	0,002	0,20
AS	0,002	0,01
RMSS	0,32	0,4
ASE	0,63	0,4
n	24.166	21.835

n = Número de observações da malha amostral; C₀ = Efeito Pepita; C1 = Contribuição; IDE = Índice de Dependência Espacial; RMS = Raiz quadrada da média do erro; MS = Média do erro padronizado; RMSS = Raiz quadrada da média do erro padronizado ao quadrado; ASE = Média da variância do erro padronizado; Esf = Esférico; Exp = Exponencial; Mod = Moderado.

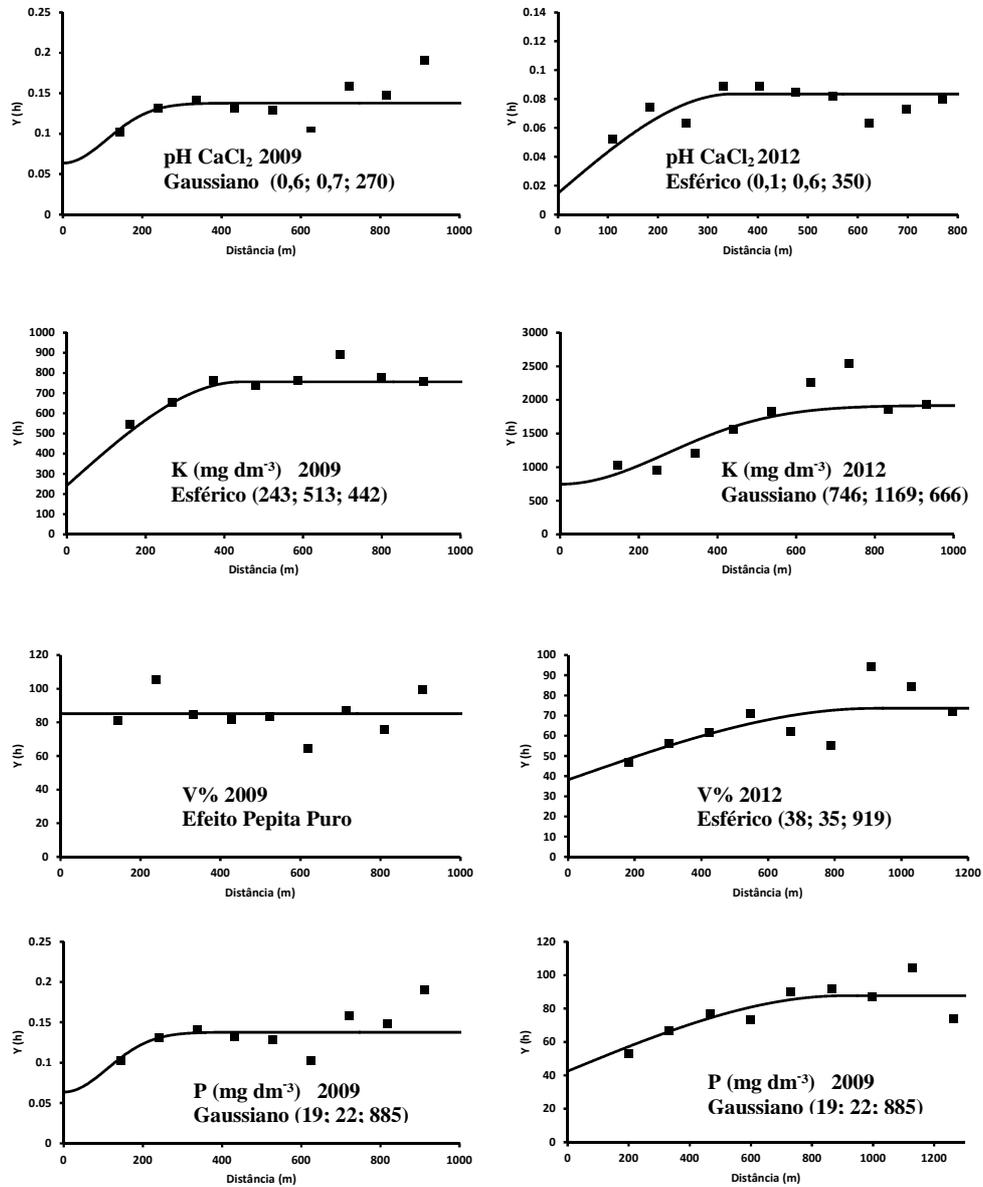


Figura 1 Semivariogramas dos atributos do solo pH em CaCl₂, K⁺, V% e P, do talhão A, nos anos de 2009 e 2012. Modelo (Efeito Pepita; Contribuição; Alcance)

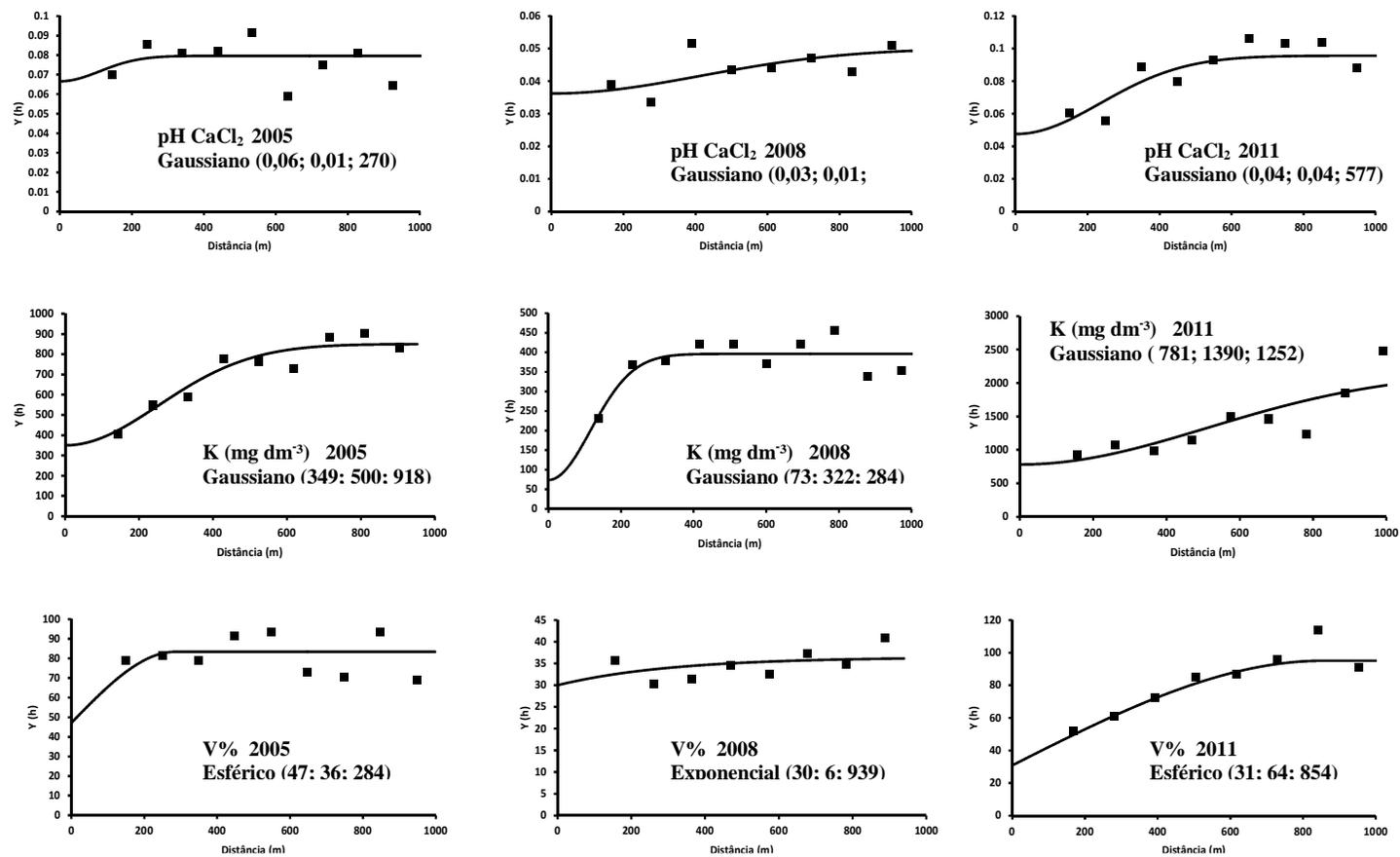


Figura 2 Semivariogramas dos atributos do solo pH em CaCl_2 , K^+ e $\text{V}\%$, do talhão A, nos anos de 2005, 2008 e 2011. Modelo (Efeito Pepita; Contribuição; Alcance)

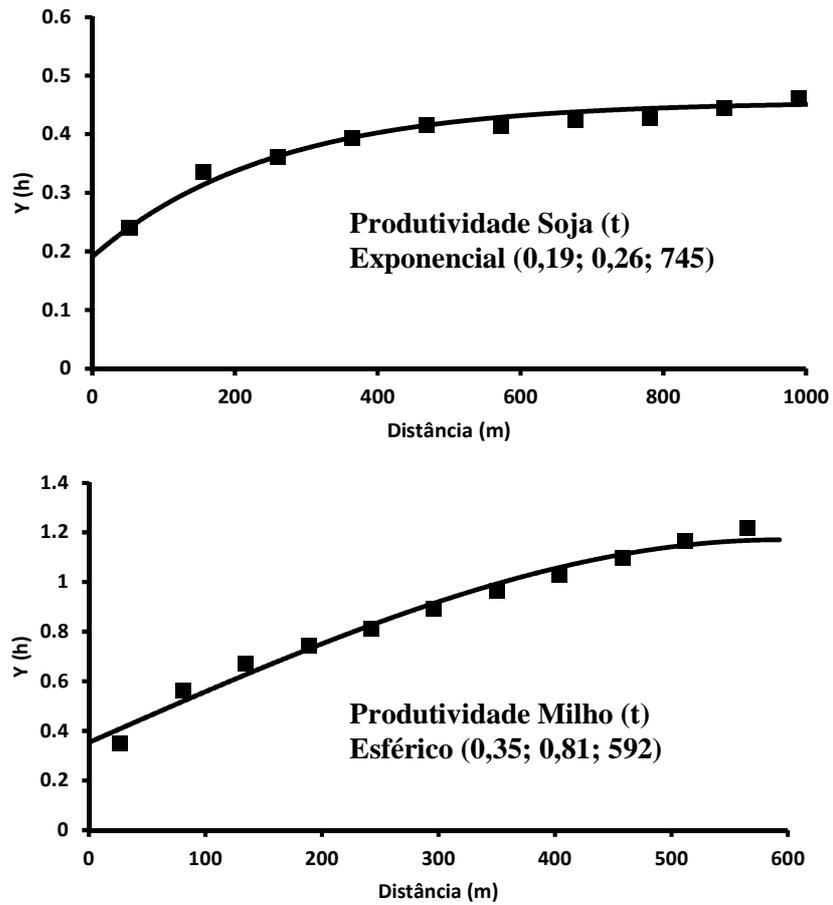


Figura 3 Semivariogramas para produtividade de grãos em toneladas, de soja no talhão A e milho no talhão B, na safra 2012/2013. Modelo (Efeito Pepita; Contribuição; Alcance).

4.3 Evolução da fertilidade do solo nos talhões em função do manejo à taxa variável

Buscou-se avaliar a evolução da fertilidade do solo pela modelagem geoestatística e geração dos mapas interpolados por krigagem a partir dos dados dos atributos do solo nos talhões ao longo do tempo de adoção da agricultura de precisão.

Mapas temáticos comparativos dos atributos K, pH em CaCl_2 , P e V%, além de mapas de prescrição de insumos são apresentados nas Figuras 4 a 19. Os mapas de prescrição de gesso são apresentados na Figura 20.

Ressalta-se que nos talhões A e B foram aplicados calcário, cloreto de potássio (KCl) e gesso agrícola à taxa variável, em quantidades e em anos distintos. Adicionalmente, o talhão A recebeu aplicação do adubo fosfato monoamônico (MAP) à taxa variável.

Coerentemente, a maioria dos mapas diagnósticos de disponibilidade de nutrientes e da condição de acidez tem correspondência com os respectivos mapas de prescrição de insumos elaborados pela empresa CAMPO para o manejo da fertilidade do solo nos talhões (Figuras 8, 9, 11, 12, 14, 15 e 16), exceto os atributos pH CaCl_2 e V% no talhão A/2009 e A/2012 (Figuras 4 e 5). Nesse caso, a discordância entre o mapa diagnóstico gerado neste estudo e o correspondente mapa de prescrição da CAMPO é explicada pela possibilidade de critérios ou rotinas um pouco diferentes terem sido utilizados no reprocessamento dos dados de solo para obtenção dos mapas diagnósticos aqui apresentados. A forma de detecção e a posterior eliminação de *outliers* podem estar associadas a essa inconformidade, pois a remoção desses dados afeta a conformação de regiões discriminadas no mapa interpolado.

Baseando-se na visualização dos mapas e nos semivariogramas experimentais das áreas amostradas, infere-se sobre os padrões espaciais dos atributos de fertilidade do solo antes e após a aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável. Todavia, a comparação dos padrões identificados nos mapas diagnósticos derivados das duas amostragens

realizadas no talhão A (Figuras 6, 7, 10 e 13) não permite comprovar tendências claras de uniformização quanto aos atributos relacionados à acidez do solo (pH e saturação por bases) ou disponibilidade dos nutrientes P e K. Trabalho desenvolvido em áreas produtoras de grãos sob sistema plantio direto, no Rio Grande do Sul, mostra que foi possível identificar diferentes zonas de produtividade, com o uso de três mapas de produtividade (SANTI et al., 2013). Ao que tudo indica, inferências baseadas na comparação de apenas duas amostragens consecutivas são pouco consistentes e qualquer conclusão a respeito seria precipitada.

A variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solos permite a recomendação de aplicação de corretivos e fertilizantes com taxas variadas, proporcionando economia e maior eficiência na aplicação (WANG et al., 2006). Entretanto, de acordo com os obtidos, nota-se que a otimização de aplicação de insumos depende de cada situação. Dispondo de dados de três amostragens, verifica-se que, a aplicação de calcário à taxa variável no talhão B, após o monitoramento da fertilidade do solo em 2005 (Figura 14), contribuiu para corrigir acidez do solo proporcionando certa homogeneização do pH e da saturação por bases na amostragem subsequente, em 2008 (Figura 15). Entretanto, esse comportamento não foi evidenciado em 2011 (Figuras 16,17 e 18), após uma segunda aplicação do corretivo à taxa variável em 2008.

A partir da aplicação da AP, é possível definir zonas específicas de manejo da fertilidade do solo, possibilitando a aplicação de insumos com taxas variadas, visando à homogeneização da fertilidade do solo (HURTADO et al., 2009). Conforme pressupõem muitos técnicos e agricultores que adotam a agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo, esperava-se que as aplicações à taxa variável de calcário uniformizassem o pH do solo e a saturação por bases em toda área com o tempo. Entretanto, o que se observa é certa tendência de alternância de regiões identificadas nos mapas ao longo do tempo. Ou seja, algumas regiões do talhão onde foi necessária uma maior dose de aplicação de calcário em

2005 (Figura 14) necessitaram de uma dose baixa ou nula em 2008 (Figura 15) e novamente aparecem com maior grau de acidificação no monitoramento em 2011 (Figuras 16 a 18). Essa alternância de regiões contrastantes nos mapas a cada duas amostragens é plausível, ao se considerar que os processos de acidificação atuam continuamente nas áreas de cultivo. Assim os locais que deixam de receber ou recebem menor aplicação de corretivos num ano estão mais propensos a expressar acidez na amostragem no ano subsequente.

Devido à relação direta que a saturação por bases tem com o pH do solo, foi verificada concordância entre os mapas de V% e os mapa de pH do solo do talhão B (Figuras 15 e 16).

No talhão B não houve aplicação à taxa variável do adubo KCl no período de 2005 até a amostragem de 2011, entretanto, os mapas de K (Figura 19) comprovam que os padrões de disponibilidade do nutriente não permanecem estáveis ao longo do tempo. Existem regiões com teores diferenciados que vão sofrendo alterações quanto à sua distribuição espacial, apesar do manejo uniforme que vinha sendo realizado no talhão. A variação espacial e temporal da produtividade é um dos fatores que podem explicar as oscilações de disponibilidade de nutrientes no solo, em função das taxas de exportação desses nutrientes variarem com os níveis de produtividade em diferentes partes do talhão. Essa falta de tendência temporal em áreas manejadas com adubação à taxa fixa reforça a constatação de que é improvável que a adoção da agricultura de precisão com intervenções à taxa variável venha a resultar de fato numa condição de fertilidade homogênea dentro do talhão e temporalmente estabilizada pela utilização periódica dos procedimentos de amostragem georreferenciada e aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável. Portanto, esse argumento leva a crer que a agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo deve se justificar por outros benefícios, como a possibilidade de se economizar insumos ou melhor alocá-los conforme as variações no talhão.

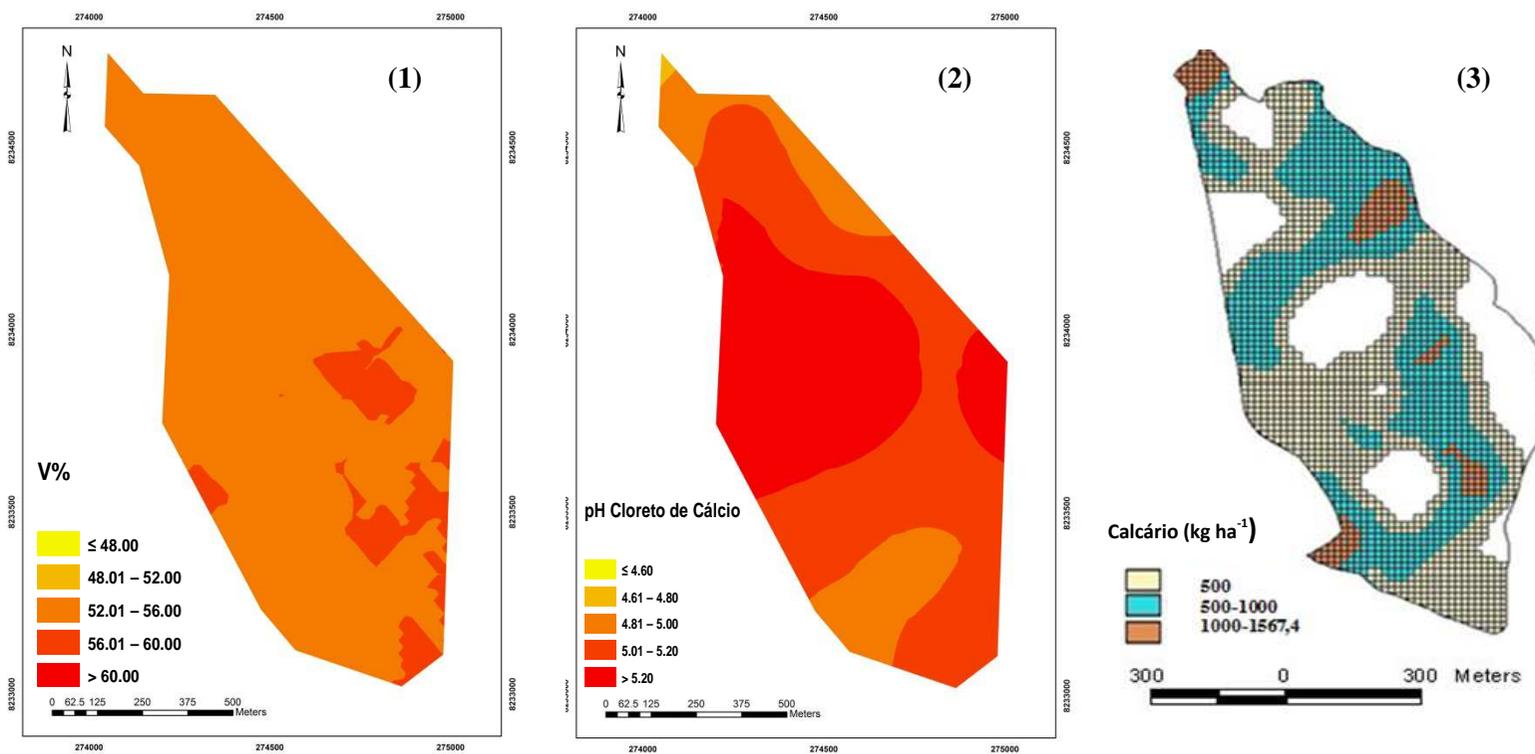


Figura 4 Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e do pH do solo (2), e mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

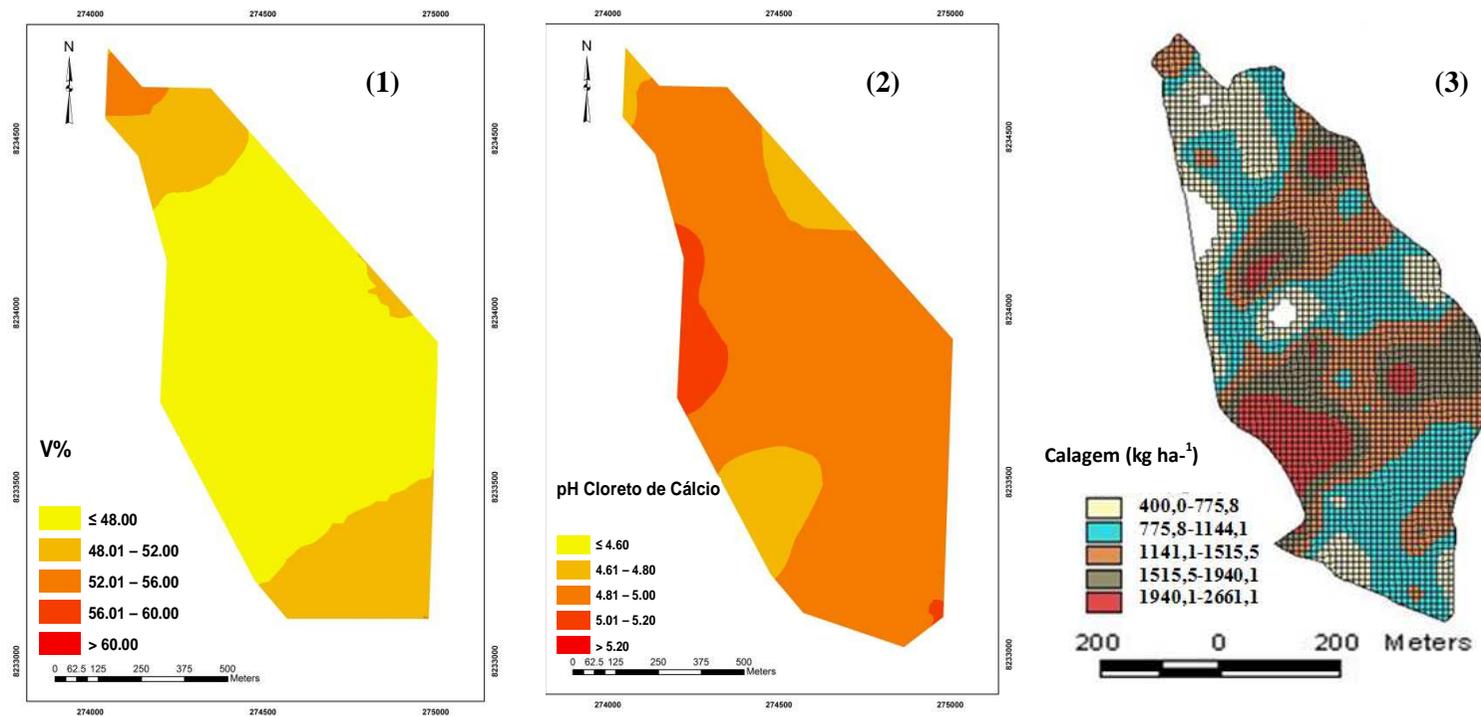


Figura 5 Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e do pH do solo (2), e mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão A, no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

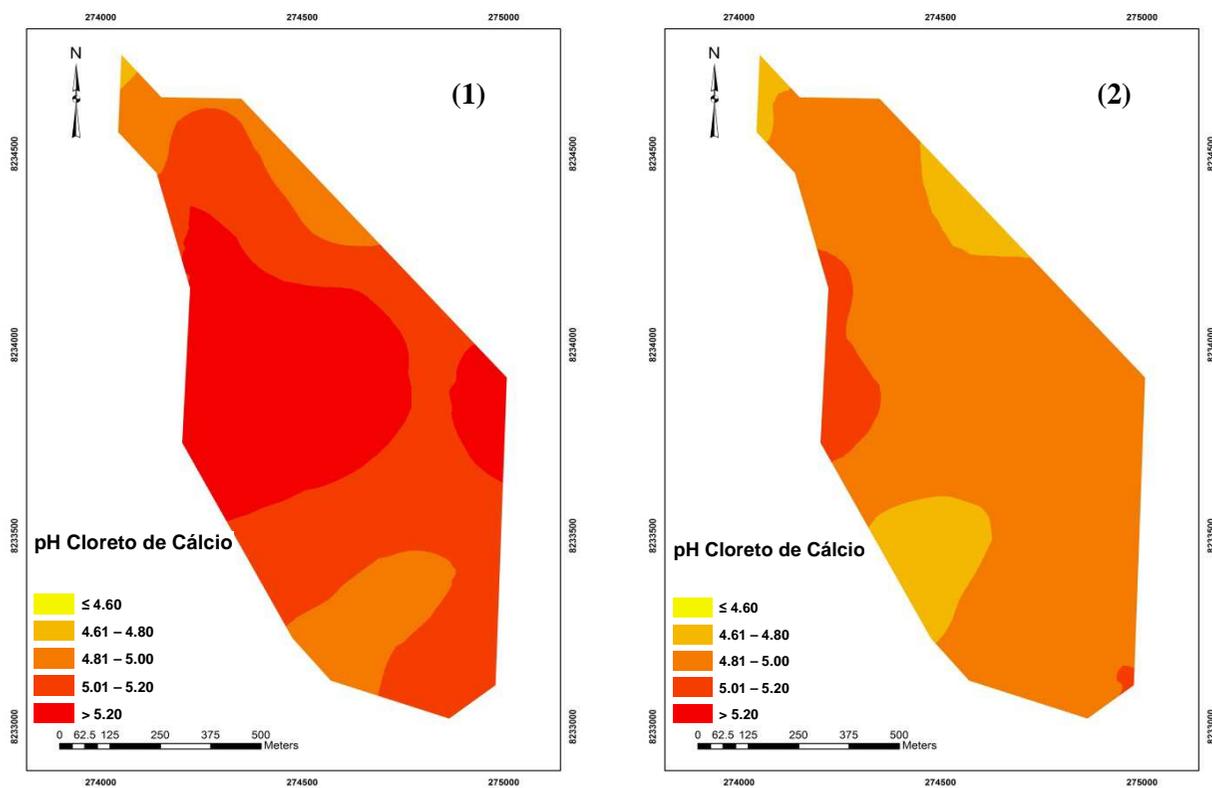


Figura 6 Mapas diagnóstico do pH do solo, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2)

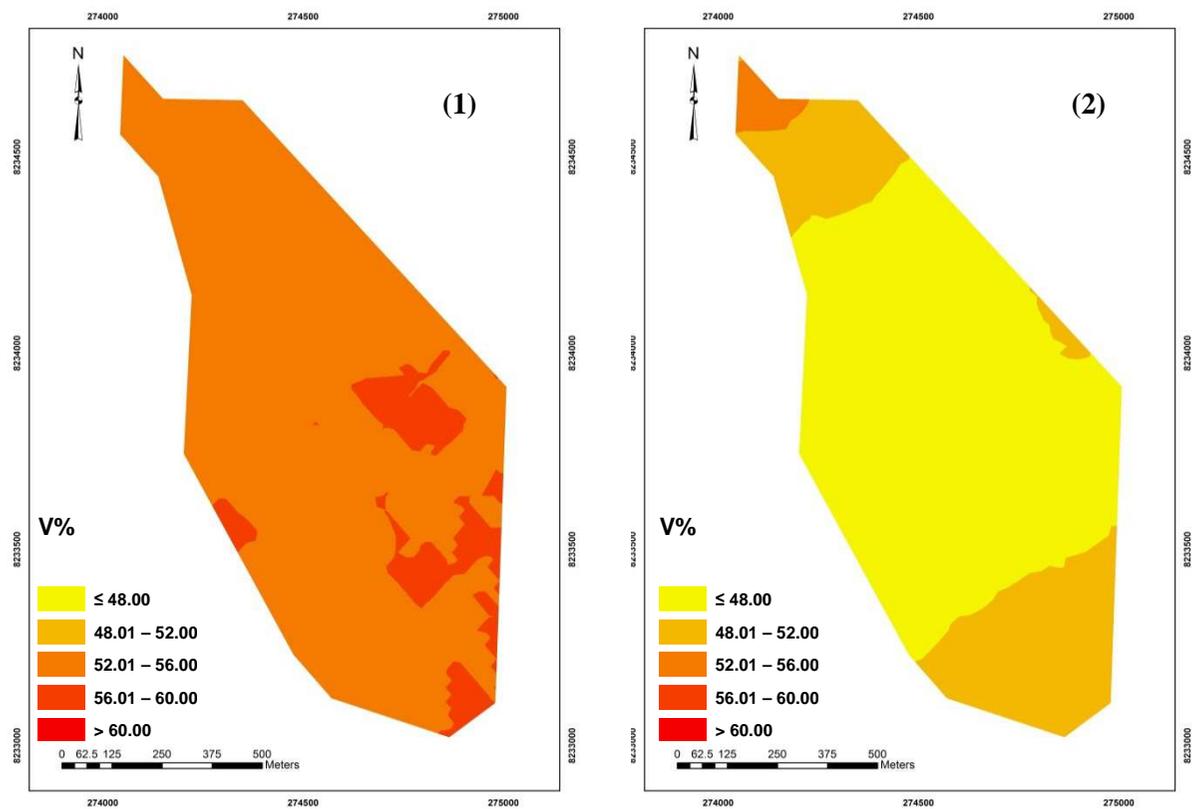


Figura 7 Mapas diagnóstico da saturação por bases, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2)

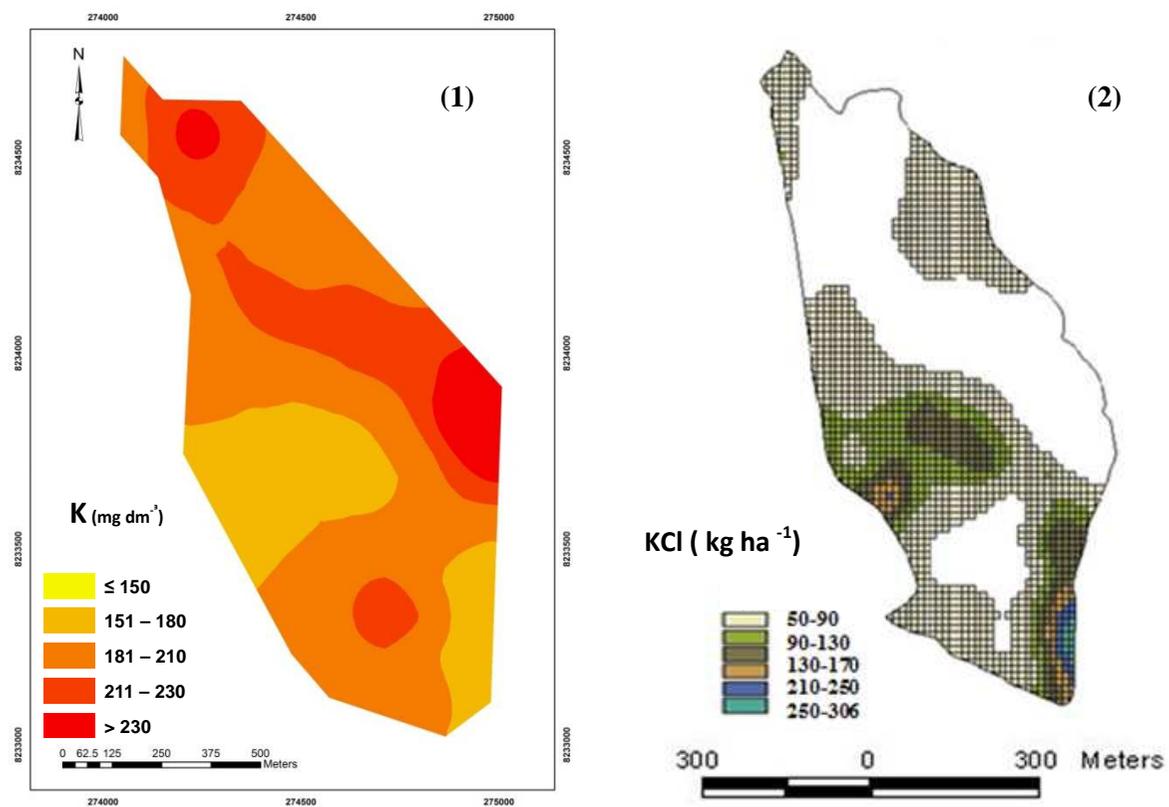


Figura 8 Mapa diagnóstico de K (1) e mapa de prescrição da necessidade de KCl (2), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

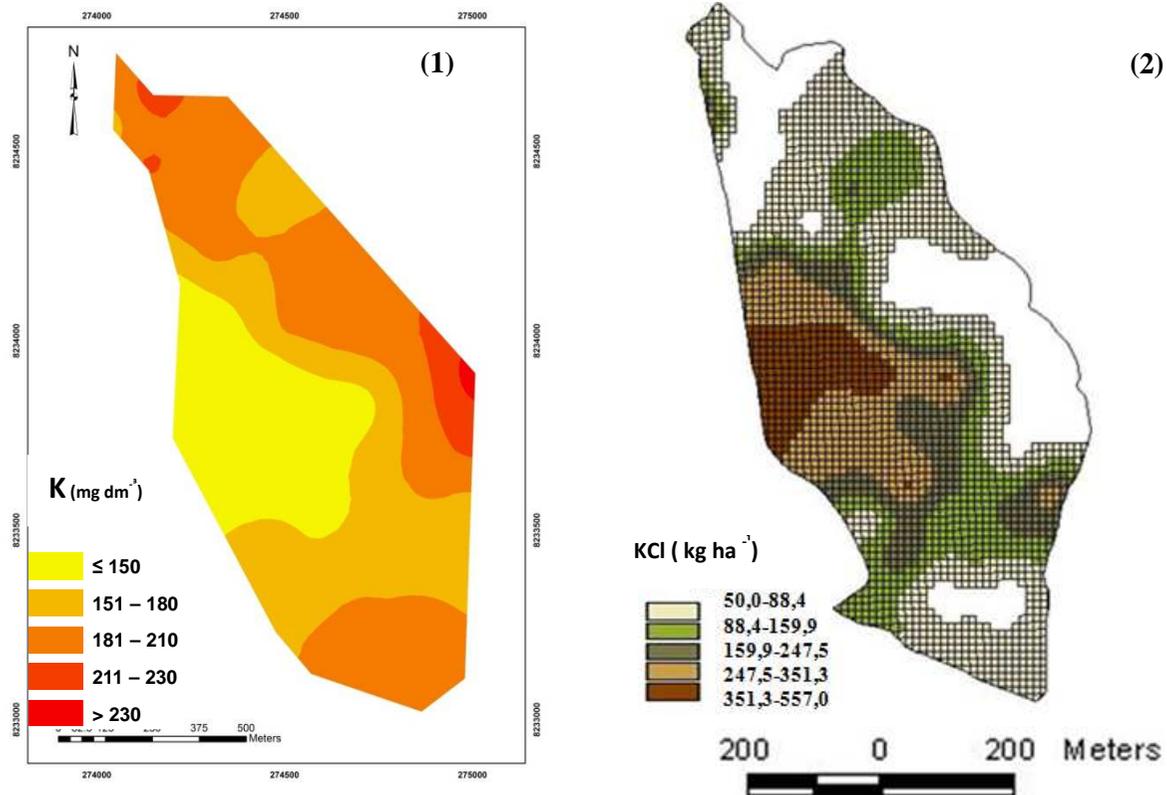


Figura 9 Mapa diagnóstico de K (1) e mapa de prescrição da necessidade de KCl (3), referentes ao talhão A, no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

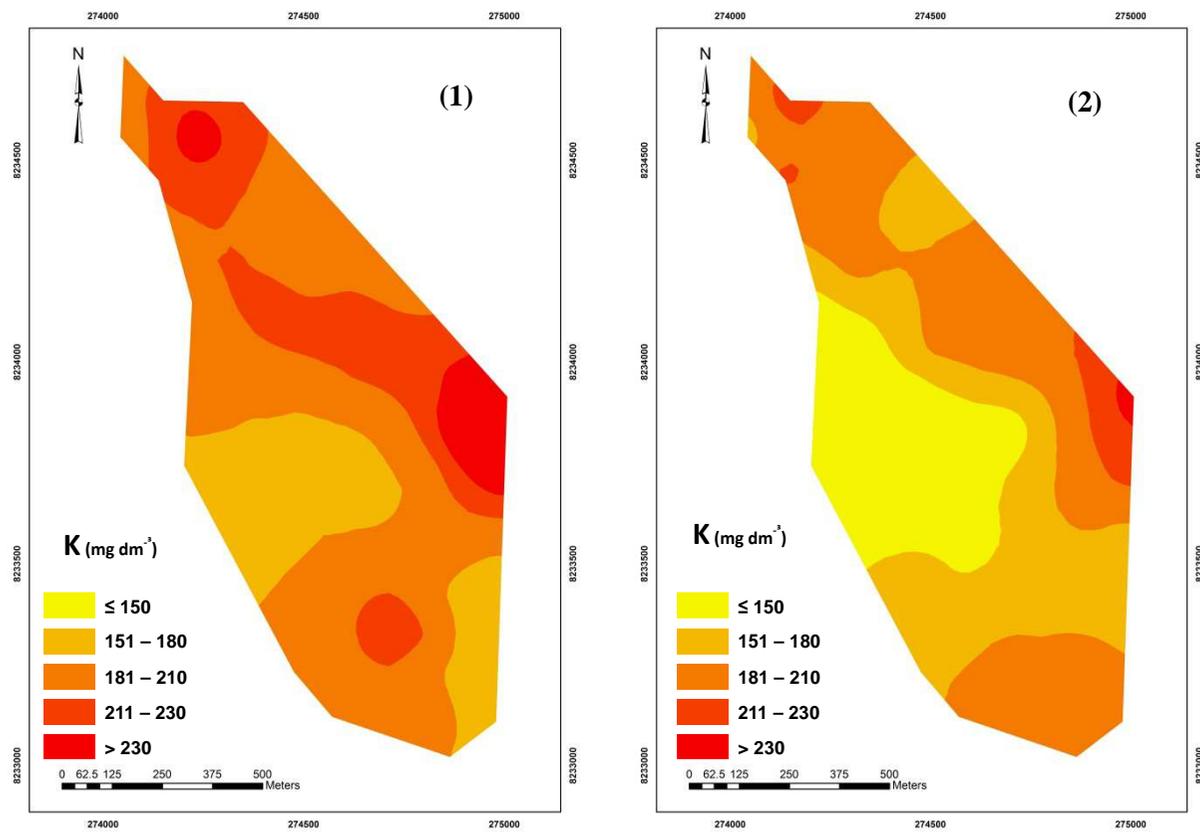


Figura 10 Mapas diagnóstico de K, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012 (2)

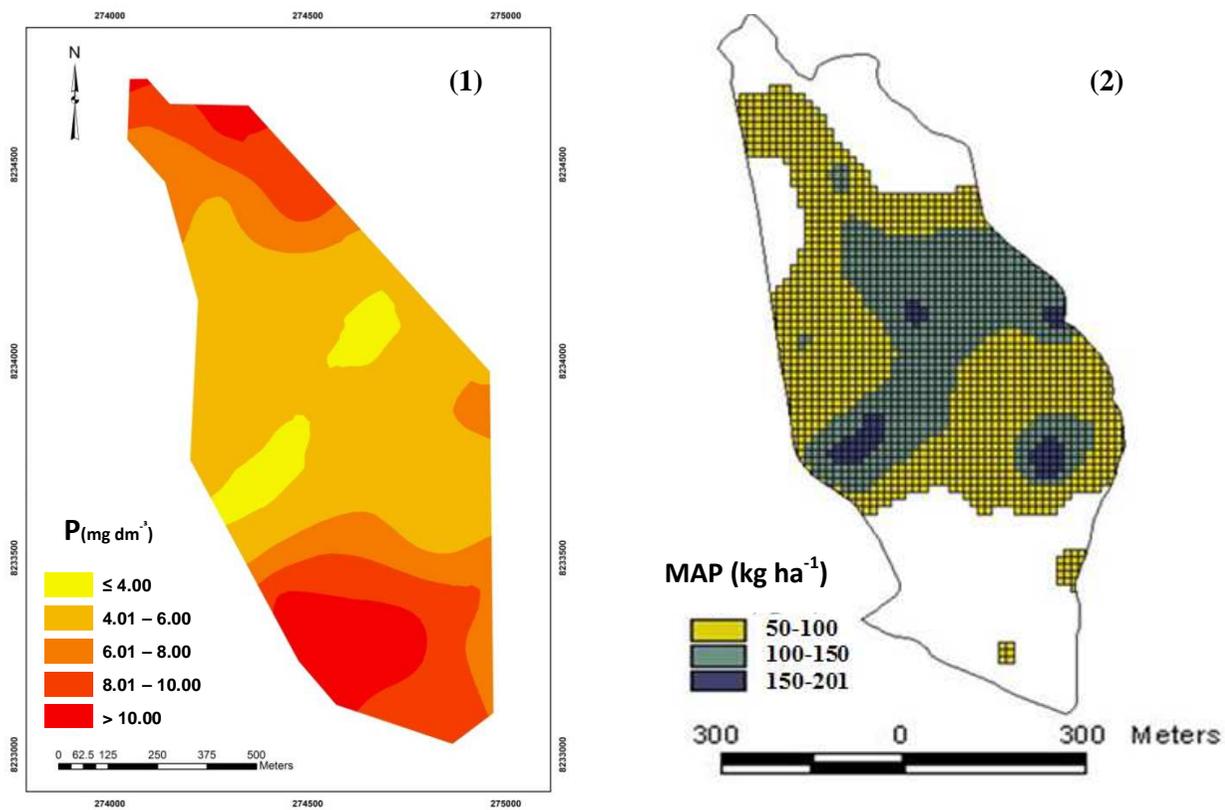


Figura 11 Mapa diagnóstico do P (1) e mapa de prescrição da necessidade de MAP (2), referentes ao talhão A, no ano de 2009. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

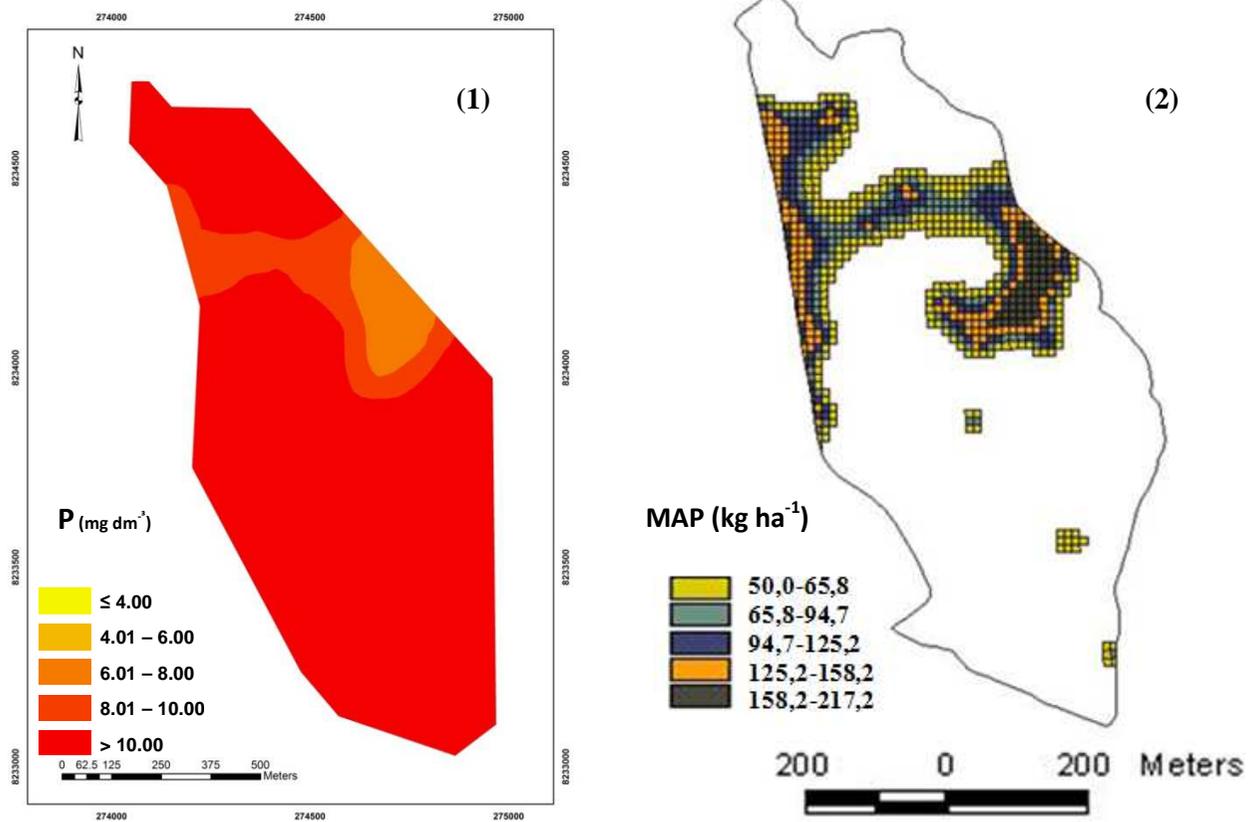


Figura 12 Mapa diagnóstico de P (1) e mapa de prescrição da necessidade de MAP (2), referentes ao talhão A, no ano de 2012. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

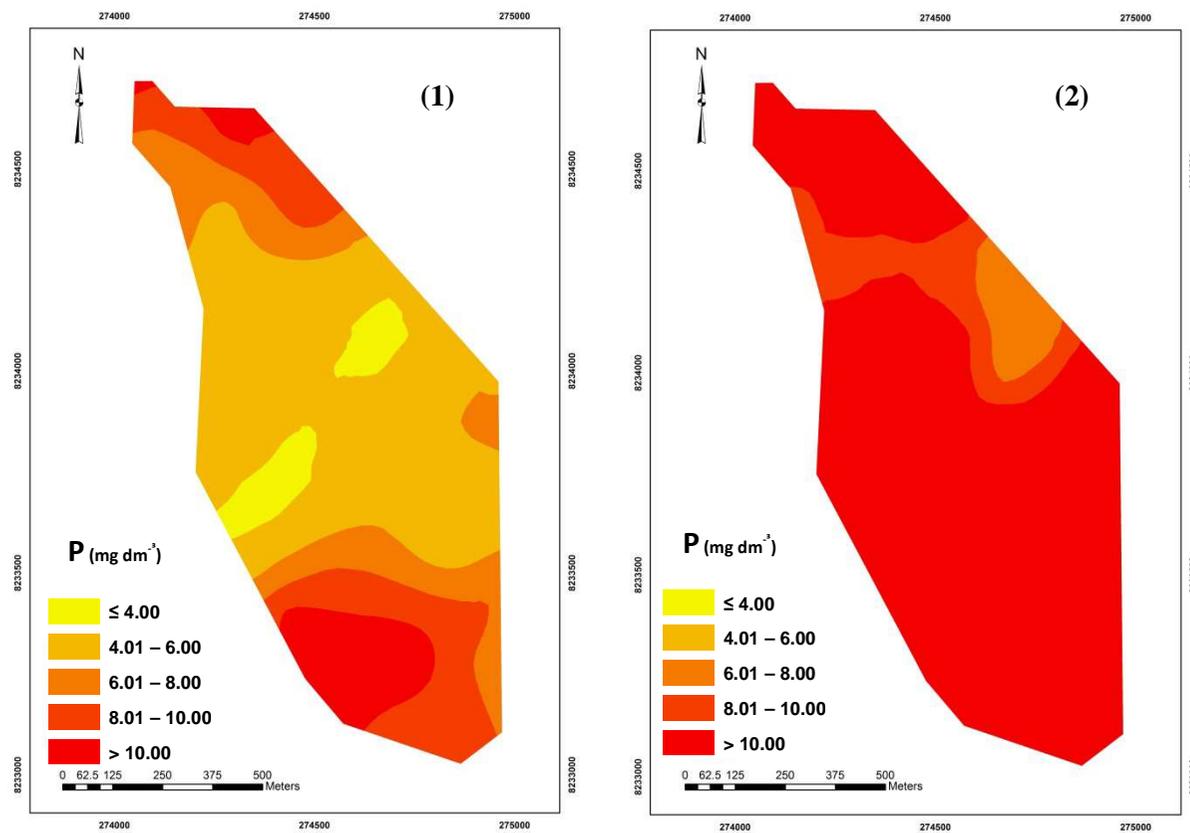


Figura 13 Mapas diagnóstico de P, referentes ao talhão A, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2009 (1) e 2012(2)

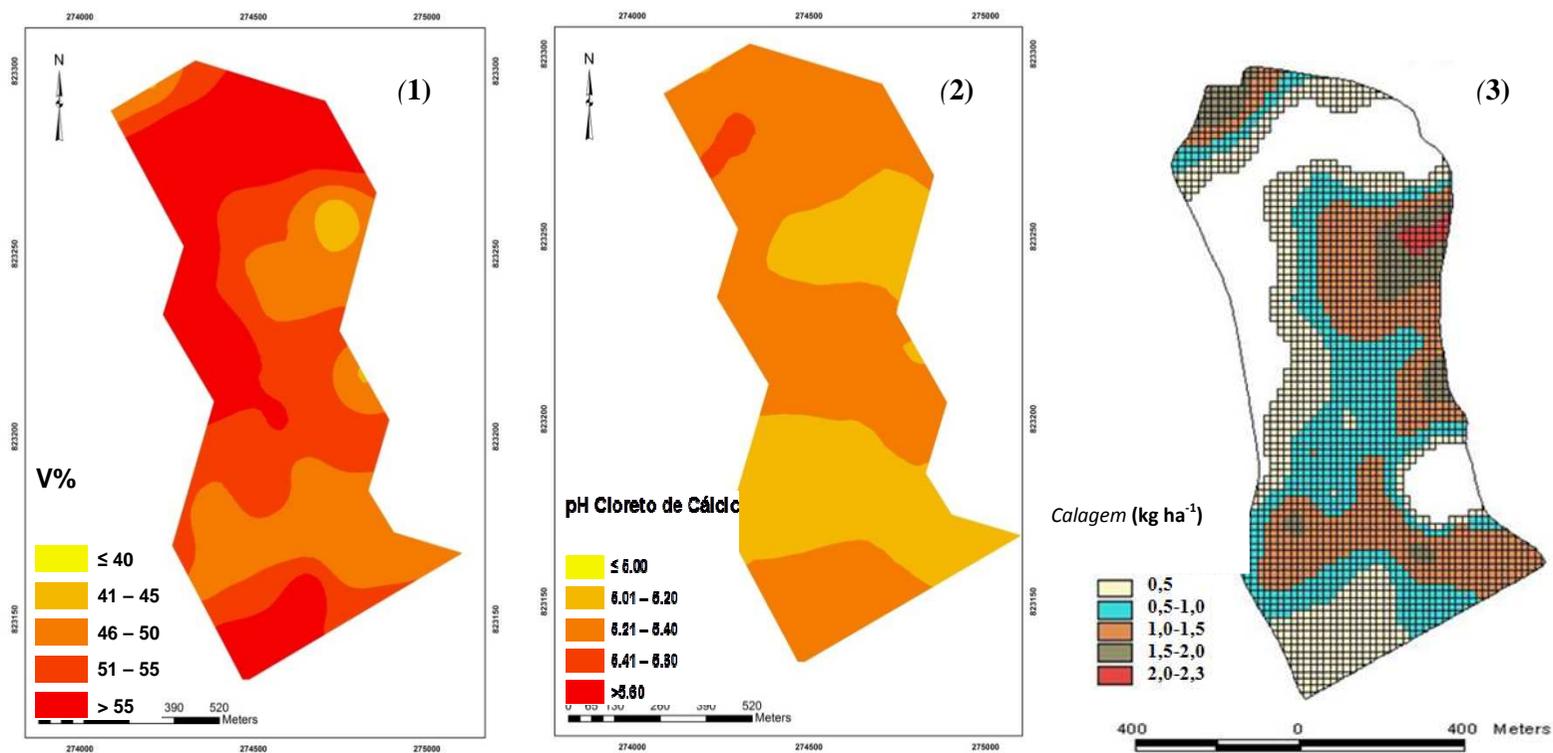


Figura 14 Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e do pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2005. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

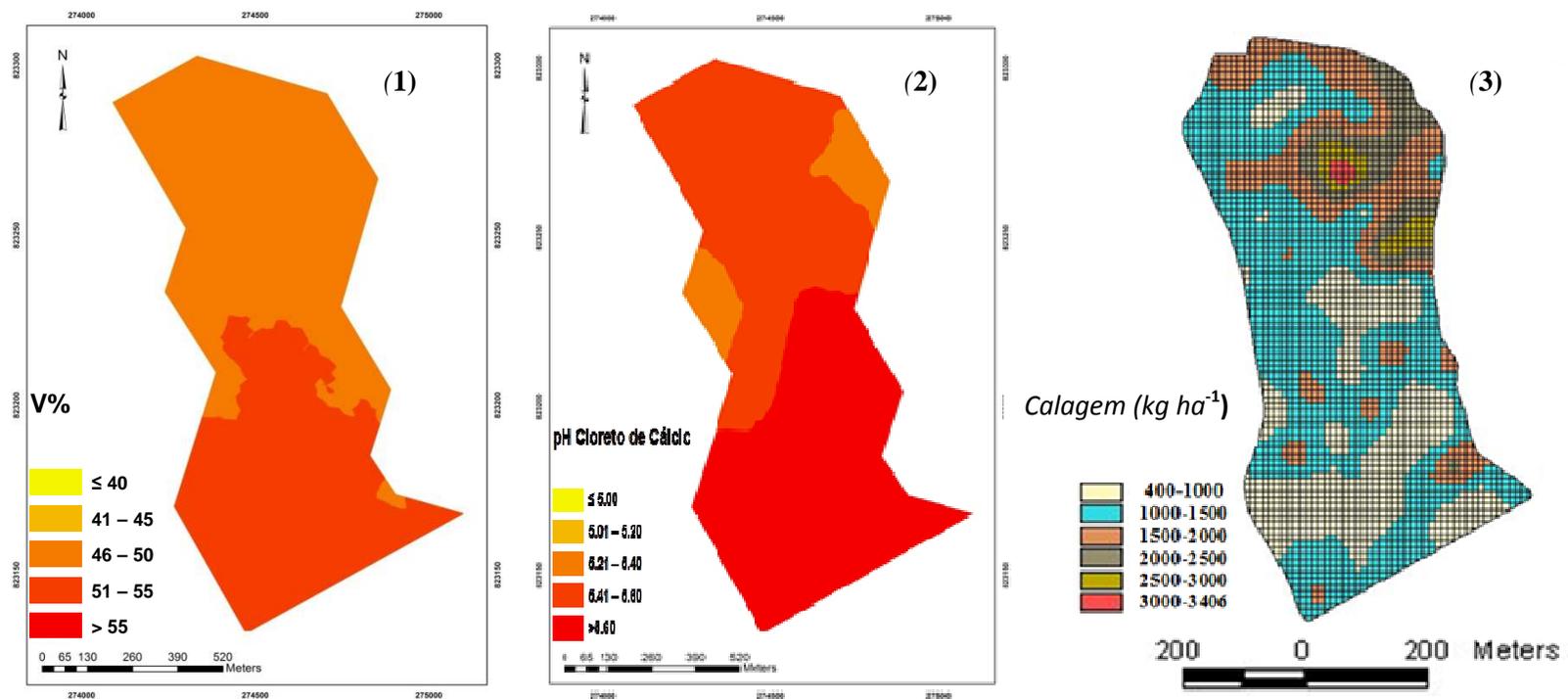


Figura 15 Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e do pH do solo (2), mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2008. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

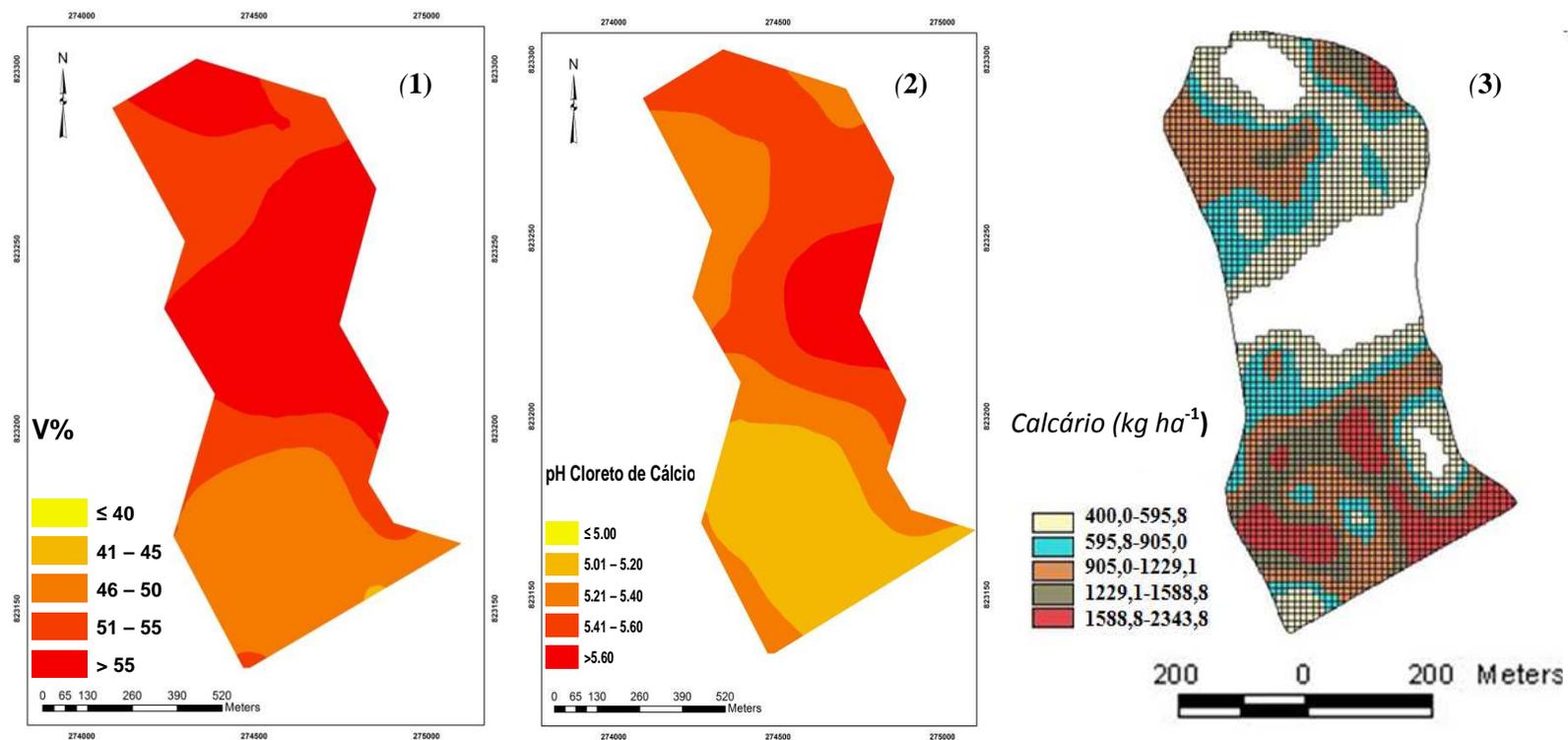


Figura 16 Mapas diagnóstico da saturação por bases (1) e do pH do solo (2) e mapa de prescrição da necessidade de calagem (3), referentes ao talhão B, no ano de 2011. Mapa de prescrição conforme processado pela empresa CAMPO

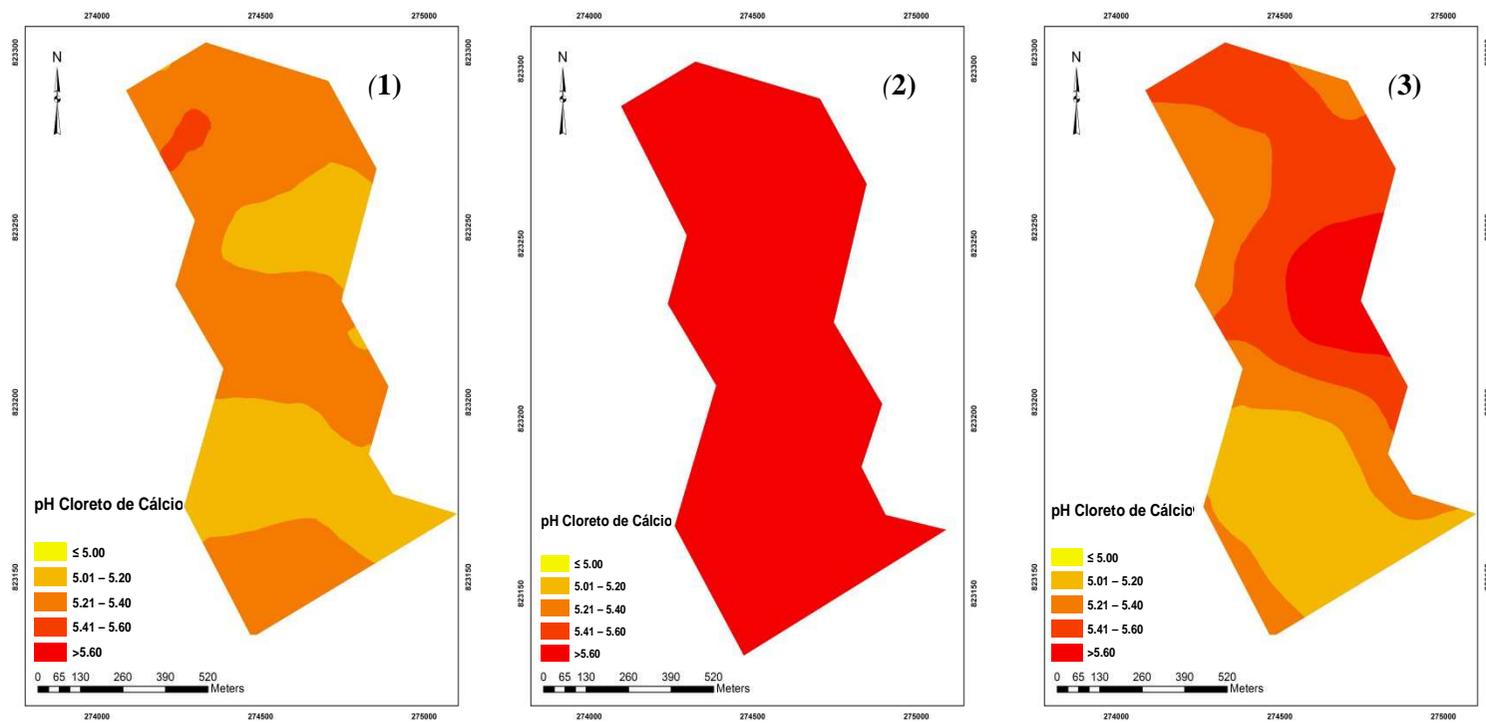


Figura 17 Mapas diagnóstico de pH, referentes ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3)

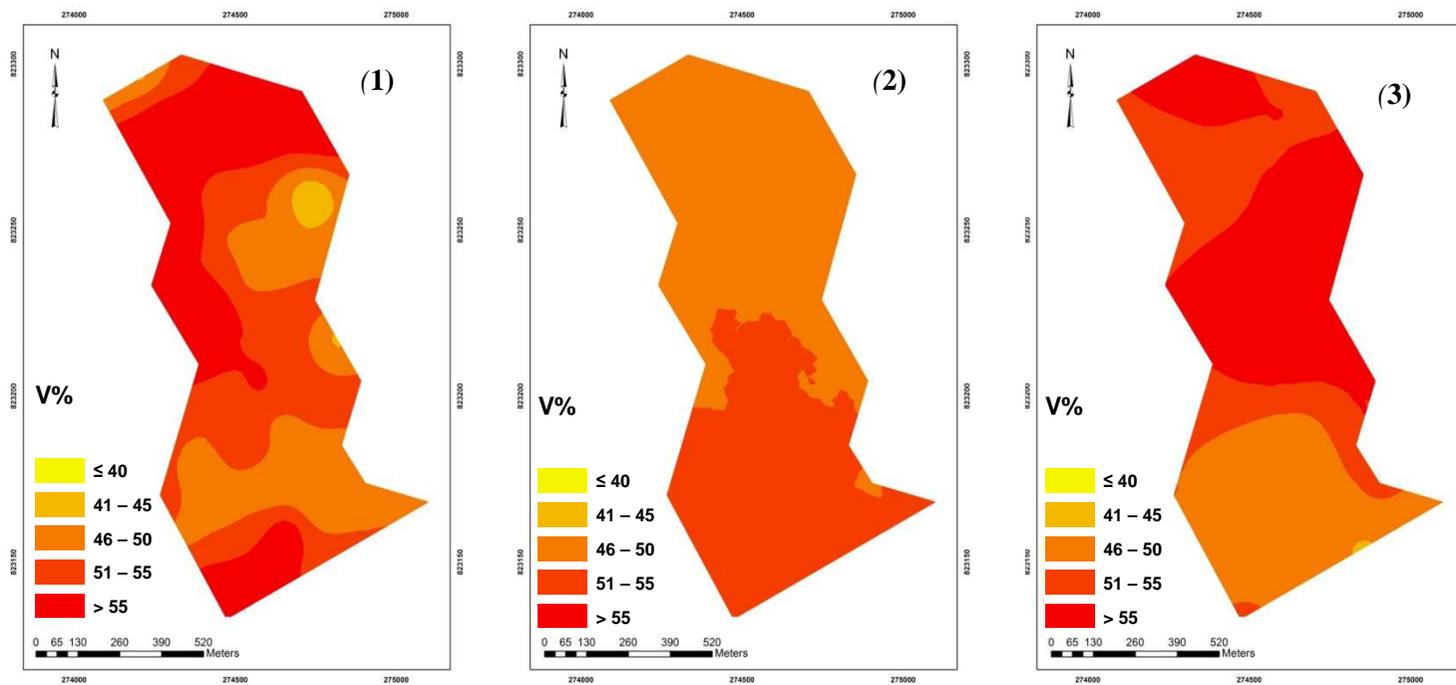


Figura 18 Mapas diagnóstico da saturação por bases, referentes ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3)

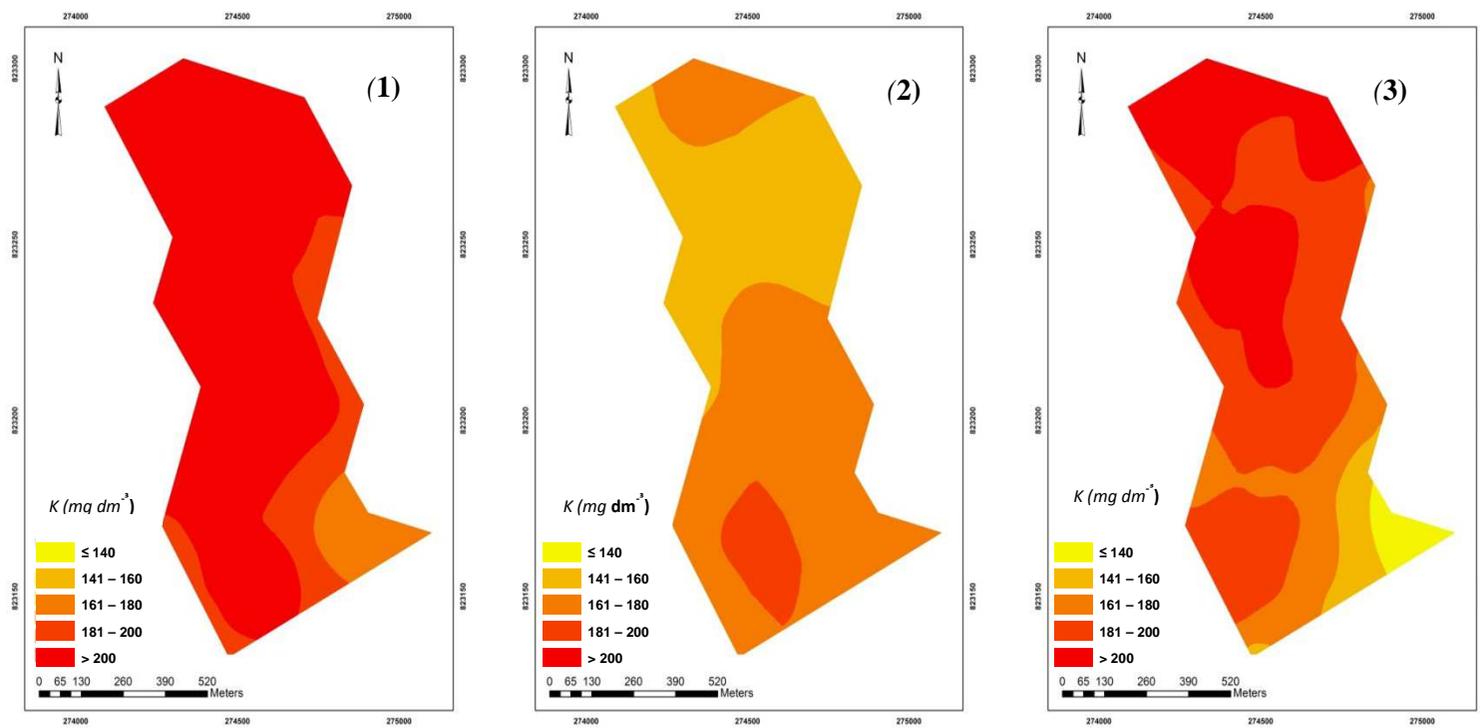


Figura 19 Mapas diagnóstico do K, referentes ao talhão B, comparativos entre amostragens realizadas nos anos 2005 (1), 2008 (2) e 2011 (3)

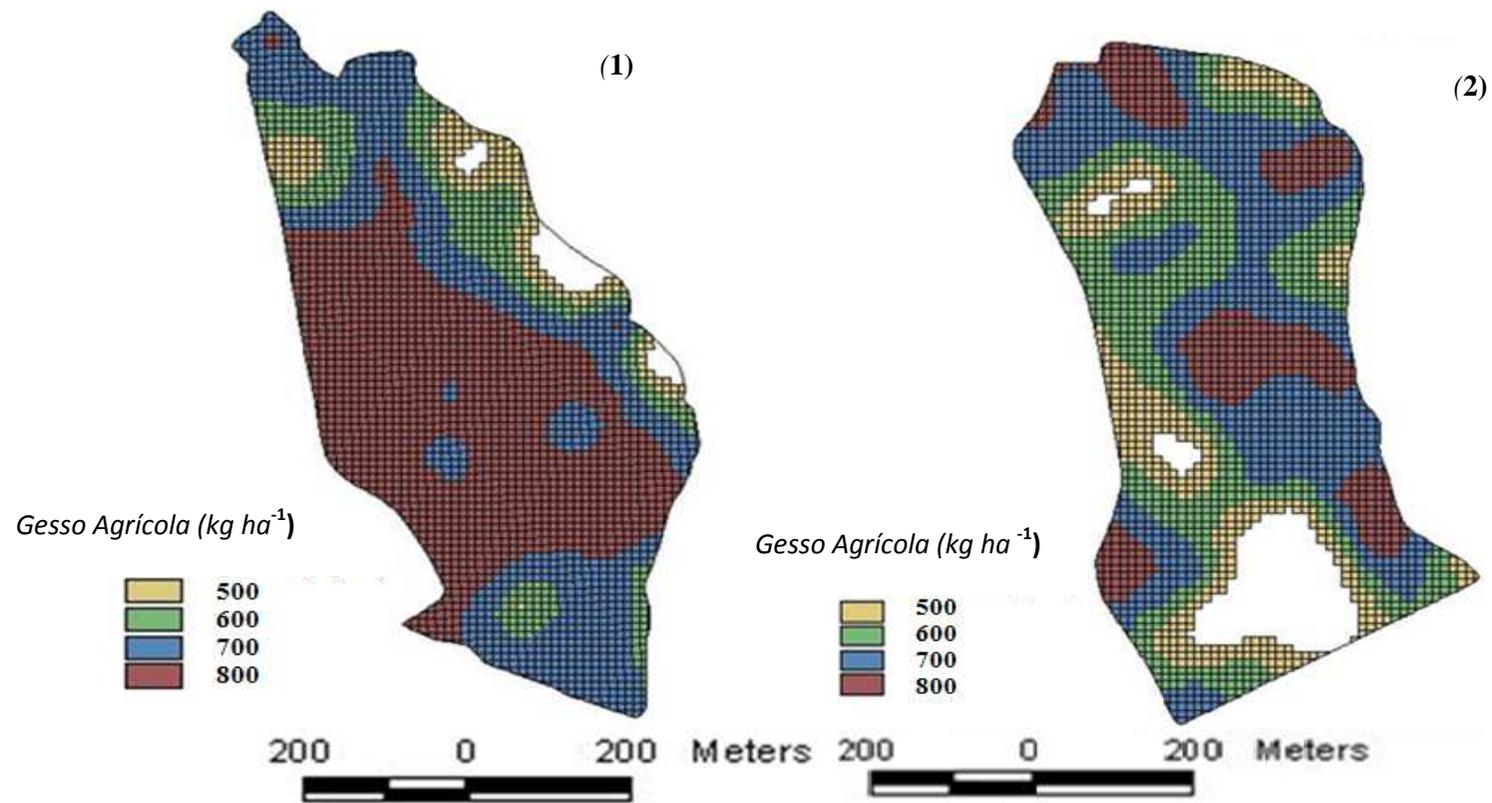


Figura 20 Mapas de prescrição de gesso agrícola para os talhões A em 2012 (1) e no talhão B em 2011 (2)

4.4 Padrões de produtividade das culturas de soja e milho em talhões com manejo à taxa variável da fertilidade do solo

A variabilidade espacial da produtividade de grãos de diversas culturas tem sido constatada nas lavouras, entretanto, poucas vezes se faz associação com a variabilidade espacial da fertilidade do solo, o que motiva a necessidade de avaliar as técnicas de manejo utilizadas (YANG et al., 2002).

Assim como os atributos de fertilidade do solo, os dados da produção de soja e de milho (Figura 21) apresentaram variabilidade espacial, porém expressando, em geral, padrões de alto rendimento em produtividade.

A medição da variabilidade espacial da cultura é um componente fundamental da AP. Com o uso desse conjunto de tecnologias, espera-se o aumento da produtividade e uniformização das áreas agrícolas (RAGAGNIN; SENA JUNIOR; SILVEIRA NETO, 2010). Entretanto, a variabilidade encontrada nos talhões A e B (Figura 21) evidencia que, a aplicação da agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo não garante total homogeneização das áreas em termos de produtividade.

O monitoramento espacializado da produtividade de grãos nos talhões de cultivo constitui uma base de informações de grande valor para o gerenciamento agrônomo da propriedade, podendo subsidiar a tomada de decisão quanto às intervenções de manejo nas lavouras. A alta densidade amostral obtida com os sensores acoplados à colhedora permite a geração de mapas confiáveis e representativos do desempenho das culturas em resposta ao manejo agrônomo (RESENDE et al., 2010). Não obstante, a análise de mapa de produtividade de apenas uma safra, como no caso deste estudo, não permite discriminar a ocorrência de variabilidade temporal, sendo insuficiente para se identificar regiões de produtividade contrastante dentro dos talhões e assim definir zonas para manejo localizado no futuro.

Quando se dispõe de uma sequência temporal de mapas de produtividade de várias safras, a identificação de zonas com produtividade

distinta no talhão abre perspectivas para amostragens direcionadas e diagnóstico dos fatores mais fortemente ligados à produtividade nas referidas zonas, possibilitando refinar critérios para o manejo localizado e aprimorar as práticas de agricultura de precisão. No Rio Grande do Sul, Santi et al. (2012) utilizaram essa abordagem com dados de seis safras e verificaram que altos teores de K, provocando desequilíbrio entre cátions, e baixa infiltração de água no solo foram os principais condicionantes de variabilidade do rendimento de grãos na área estudada.

As variações evidenciadas nos mapas de produtividade dos talhões A e B (Figura 21) denotam que a remoção de nutrientes com a colheita dos grãos pode afetar diferencialmente o status de fertilidade do solo em diferentes partes da lavoura. Dessa maneira, a exportação de nutrientes nas colheitas, juntamente com outros fatores, acabam promovendo interferências na dinâmica da fertilidade do solo, fazendo com que prevaleçam padrões heterogêneos de distribuição espacial de seus atributos químicos a cada amostragem realizada ao longo do tempo. Esse aspecto pode explicar, em parte, a falta de uniformidade de mapas de atributos do solo mesmo após algum tempo sendo manejado com agricultura de precisão, como foi o caso do presente estudo. Nessa lógica, não se deve esperar que a homogeneização e estabilização da fertilidade do solo venham a ser garantidas pela aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variável.

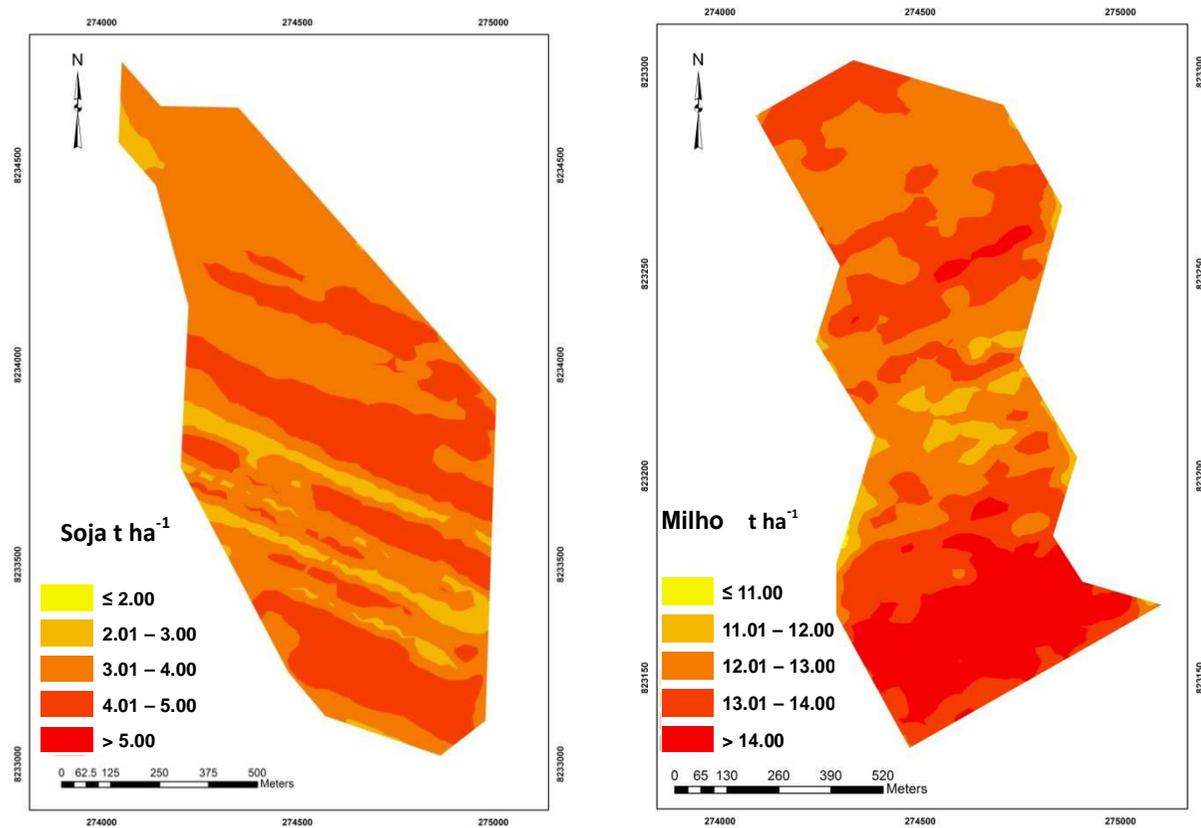


Figura 21 Mapas de produtividade de grãos de soja em t h⁻¹ no talhão A e milho t ha⁻¹ no talhão B, na safra 2012/2013.

4.5 Avaliação econômica das aplicações à taxa variável

Uma avaliação simplificada de custos de insumos relacionados às aplicações à taxa variável em comparação ao que seria gasto nas aplicações em dose média fixa é apresentada nas Tabelas 11 e 12, para os talhões A e B, respectivamente.

Independente do manejo aplicado, o maior gasto com fertilidade do solo está relacionado com a adubação e o menor com a aplicação de corretivos da acidez. O consumo de fertilizantes, chegou a representar 76% dos gastos com o manejo da fertilidade do solo no talhão A e 97 % no talhão B (Tabelas 11 e 12). A utilização do fertilizante KCl foi o que mais pesou nos gastos nos dois talhões, visto que, com manejo à taxa variável, a aplicação de KCl variou de 37 a 97% do custo total de insumos e na aplicação à taxa fixa, cerca de 65%.

Nas simulações efetuadas para este estudo, em alguns casos não houve economia de insumo pela aplicação à taxa variável em relação à taxa fixa (Tabelas 11 e 12). Cabe ressaltar que, de modo geral, os solos dos talhões possuem alta fertilidade e a simulação do custo com manejo à taxa fixa foi feita a partir de média dos dados de análise de um grande número de amostras de solo (todas que foram coletadas na amostragem para agricultura de precisão), o que torna a referida média mais próxima de um valor realmente representativo do *status* de fertilidade no talhão. Ou seja, se fosse usado o método de amostragem tradicional do solo para se determinar a dose média fixa, a quantidade de amostras simples seria muito menor do que a obtida na amostragem em malha regular a cada dois hectares e isso diminuiria a representatividade dos dados de análise. Dessa forma, se os solos dos talhões fossem mais heterogêneos quanto à fertilidade e se de fato fosse feita uma amostragem tradicional para se calcular as doses médias fixas dos insumos, haveria maior chance de se comprovar economia com o

manejo envolvendo amostragem georreferenciada e aplicações de insumos à taxa variável.

Na análise econômica, nota-se que no talhão B o manejo com aplicação de insumos à taxa variável foi economicamente mais vantajoso do que a aplicação baseada na dose média fixa dos insumos (Tabela 12), corroborando os resultados obtidos no estado de São Paulo na cultura de cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2008; SOUZA et al., 2007) e na cultura do milho no Paraná (WEIRICH NETO;2006).

A aplicação localizada promoveu uma redução de 47% dos gastos com o manejo da fertilidade do solo no talhão B, representando uma economia de aproximadamente R\$23.757,60 ao longo do período de acompanhamento, quando comparado com a aplicação à taxa média fixa de insumos. Neste caso, houve menor consumo de fertilizante e corretivo, com redução de 4,7 t de KCl, 280 t de calcário e 1,9 t de gesso.

Sob a ótica econômica, os resultados obtidos no manejo do talhão B comprovam a afirmação de Caon & Genú (2013), de que a agricultura de precisão permite utilizar calcário e fertilizantes de forma mais eficiente, do que na agricultura convencional.

No talhão A, os resultados obtidos com a aplicação à taxa variável não refletiram em economia de insumos, pois o manejo à taxa fixa representaria um custo 61% menor (Tabela 11). O principal fator relacionado a essa diferença de custo seria o menor requerimento do fertilizante MAP na prescrição da adubação à taxa fixa.

Pelas divergências de resposta econômica no manejo dos dois talhões com agricultura de precisão (Tabelas 11 e 12), verifica-se que não é em toda situação que a aplicação à taxa variável de fertilizantes e corretivos leva à redução dos gastos com insumos. Entretanto, nota-se que essa prática promove uma distribuição mais coerente com as diferenças de fertilidade dentro do talhão. Logo, considerando a variabilidade de fertilidade dentro do talhão, a agricultura de precisão contribui para amenizar extremos de

disponibilidade de nutrientes, bem como, de acidez ou alcalinidade eventualmente existentes.

Weirich Neto et al. (2006), estudando a adubação na cultura do milho em uma área de 9,6 ha, concluíram que a recomendação à taxa fixa levaria à aplicação de uma subdosagem de K_2O e uma superdosagem de P_2O_5 . Um trabalho realizado por Ruffato et al. (2006), em Campo Mourão – PR, apontou que em 51% da área experimental, a recomendação de fertilizantes por taxa fixa exigiria uma quantidade de insumos superior à recomendação em taxa variável, o que implicaria em prejuízos econômicos e ambientais.

Segundo Chitolina et al. (2009), as informações sobre fertilidade do solo coletadas por meio das tecnologias de AP podem ser utilizadas por vários anos. Sendo assim, o uso em mais longo prazo dessas informações é um ponto favorável para a adoção da AP, visto que contribui para amortizar os custos referentes às operações de amostragem georreferenciada, análises de solo, processamento de dados, elaboração de mapas e distribuição de insumos à taxa variável. Seguindo este raciocínio, Coelho et al. (2009) demonstraram que, ao se considerar um ciclo de amostragem e intervenções a cada 4 anos numa área de 100 ha, o manejo da acidez do solo por meio de aplicação à taxa variável de calcário e gesso foi economicamente viável, com diluição dos custos envolvidos ao longo de um maior período de tempo, favorecendo o equilíbrio financeiro da propriedade. Adicionalmente, mais um fator a ser considerado na avaliação econômica da AP é a importância gerencial que as informações obtidas representam para a fazenda, tornando-se peça chave na tomada de decisão pelo agricultor (CHITOLINA et al., 2009).

Tabela 11 Estimativas de custos associados ao gasto de insumos nas aplicações à taxa variável e em dose média fixa no talhão A, nos anos de 2009 e 2012

Insumos Aplicados	Estimativa da quantidade de insumos no manejo à taxa variável no talhão A (t)			Preço dos insumos (R\$/t)	Gasto com insumos
	Ano 2009	Ano 2012	Total		
KCl	4,51	11,91	16,42	R\$1.342,00	R\$22.035,64
MAP	12,83	2,12	14,95	R\$1.588,00	R\$23.740,60
Calcário	35,96	89,69	125,65	R\$60,00	R\$7.539,00
Gesso agrícola	-	61,60	61,60	R\$100,00	R\$6.160,00
Total					R\$59.475,24

Insumos Aplicados	Estimativa da quantidade de insumos no manejo por dose média fixa no talhão A (t)			Preço dos insumos (R\$/t)	Gasto com insumos
	Ano 2009	Ano 2012	Total		
KCl	0,89	9,66	10,55	R\$1.342,00	R\$14.158,1
MAP	-	0,22	0,22	R\$1.588,00	R\$349,36
Calcário	22,80	96,05	118,85	R\$60,00	R\$7.131,00
Gesso agrícola	7,96	6,89	14,85	R\$100,00	R\$1.485,00
Total					R\$23.123,46

Tabela 12 Estimativas de custos associados ao gasto de insumos nas aplicações à taxa variável e em dose média fixa no talhão B, nos anos de 2005, 2008 e 2011

Área B						
Insumos Aplicados	Estimativa da quantidade de insumos no manejo à taxa variável no talhão B (t)				Preço dos insumos (R\$/t)	Gasto com insumos
	Ano 2005	Ano 2008	Ano 2011	Total		
KCl	-	-	19,7	19,7	R\$1.342,00	R\$26.437,40
Calcário	2,03	3,84	2,33	8,20	R\$60,00	R\$492,00
Gesso Agrícola	-	-	1,71	1,71	R\$100,00	R\$171,00
Total						R\$27.100,40
Insumos Aplicados	Estimativa da quantidade de insumos no manejo à taxa fixa no talhão B (t)				Preço dos insumos (R\$/t)	Gasto com insumos
	Ano 2005	Ano 2008	Ano 2011	Total		
KCl	-	-	24,47	24,47	R\$1.342,00	R\$33.147,00
Calcário	62,68	157,49	68,91	289,08	R\$60,00	R\$17.344,80
Gesso Agrícola	-	-	3,67	3,67	R\$100,00	R\$367,00
Total						R\$50.858,00

5 CONCLUSÕES

A maioria dos atributos de solo estudados apresenta coeficiente de variação classificado como médio, sendo o maior valor encontrado para o fósforo (CV=59%) e o menor para o pH em CaCl₂(CV=3%).

O índice de dependência espacial dos atributos pH CaCl₂, K, V% pode ser classificado como moderado.

Para os atributos com dependência espacial, o menor alcance registrado foi de 270 m para o pH em CaCl₂ e o maior de 1252 m para o K.

A maioria dos dados foi ajustado ao semivariograma de modelo gaussiano ou esférico.

Os atributos de fertilidade do solo nos talhões estudados apresentam padrões de variação espacial e temporal pouco relacionados ao manejo com aplicações de corretivos e fertilizantes à taxa variável. Essas aplicações modificam o *status* de fertilidade do solo, sem evidente homogeneização e estabilização dos atributos químicos em curto prazo.

A economia no gasto de corretivos e fertilizantes com o manejo à taxa variável depende da condição de cada solo ao longo do tempo e nem sempre ocorre. O uso da agricultura de precisão propiciou vantagem econômica em um dos dois talhões monitorados.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 151-157, nov./dez. 1996.
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 831-843, nov. 2009.
- AMADO, T. J. C. et al. Projeto Aquarius-Cotrijal: pólo de agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 91, p. 39-47, jan./fev. 2006.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/>>. Acesso em: 20 set. 2012.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 974-980, jul. 2008.
- CAON, D.; GENUÍ, A. M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influencia na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 629-639, jun. 2013.
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 695-703, jul./ago. 2003.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 394-400, mar./abr. 2007.

CHITOLINA, J. C. et al. Amostragem de solo para análises de fertilidade, de manejo e de contaminação. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009. p. 44-52.

COELHO, A. M.; LIMA, G. J. de O.; CUNHA, T. F. Site specific soil fertility management of an oxisol cultivated with corn for application of lime and gypsum. In: SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CENTRE OF FERTILIZERS, 18., 2009, Rome. More sustainability in agriculture: new fertilizers and fertilization management. **Abstracts...** Rome: Agricultural Reserch Council, 2009. p. 262-267.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2321-2329, dez. 1999.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1991. 928 p.

DERCON, G. et al. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1/2, p. 15-26, 2006.

EARL, R. et al. Soil factors and their influence on within-field crop variability, part I: field observation of soil variation. **Biosystems Engineering**, London, v. 84, n. 4, p. 425-440, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

GODWIN, R. J. et al. An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production. **Biosystems Engineering**, London, v. 84, n. 4, p. 533-545, Apr. 2003.

HURTADO, S. M. C. **Influência da variabilidade espacial dos atributos do solo na simulação da produtividade do milho, utilizando o CERES-maize**. 2004. 95 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

HURTADO, S. M. C. et al. **Agricultura de precisão: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no Cerrado**. Planaltina:

- EMBRAPA Cerrados, 2008. 48 p. (EMBRAPA Cerrados. Documentos, 124).
- HURTADO, S. M. C. et al. **Spatial variability of soil acidity attributes and the spacialization of liming requirement for corn.** *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras, v.33, n.5, p. 1351-1359. set/out, 2009.
- LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações.** Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.
- LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation.** New York: J. Wiley, 1978. 350 p.
- LOPES, A. S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo.** Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. 162 p.
- LUCHIARI JUNIOR, A. et al. Agricultura de precisão e meio ambiente. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto.** Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 19-36.
- MACHADO, L. O. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 599-600, maio/jun. 2007.
- MACHADO, P. L. O. A. et al. Variabilidade de atributos de fertilidade e espacialização da recomendação de adubação e calagem para soja. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto.** Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 115-130.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83 p.
- MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5 p. 839-847, set./out. 2006.
- MZUKU, M. et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1572-1579, Sept. 2005.

- NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, May/June 2011.
- OLIVEIRA, J. J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 783-789, out./dez. 1999.
- PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, n. 1, p. 1- 85, 1999.
- PONTELLI, C. B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão**. 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Rurais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.Rproject.org/>>. Acesso em: 29 maio 2013.
- RAGAGNIN, V. A.; SENA JUNIOR, D. G.; SILVEIRA NETO, A. N. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 600-607, dez. 2010.
- RESENDE, A. V. et al. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Anais...** Teresina: EMBRAPA Meio-Norte; UFPI, 2010. 1 CD-ROM.
- RESENDE, A. V. et al. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.
- RUFFATO, J. P. et al. Comparativo entre a quantidade de calcário recomendada entre os sistemas de agricultura de precisão e agricultura tradicional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2006, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.
- SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, set. 2012.

- SANTOS, A. O. et al. Monitoramento localizado da produtividade de milho cultivado sob irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 88-95, jan./abr. 2001.
- SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAMA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: BORÉM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 109-145.
- SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 85-91, jan./mar. 2000.
- 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, MG, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, nov./dez. 2003.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 416 p.
- SOUZA, Z. M. et al. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, mar./abr. 2007.
- TAYLOR, J. C. et al. Soil factors and their influence on within-field crop variability, part II: spatial analysis and determination of management zones. **Biosystems Engineering**, London, v. 84, n. 4, p. 441-453, Apr. 2003.
- URRICARIET, S.; ZUBILLAGA, M. M. Alcances y perspectivas del manejo sitio-específico de la fertilización. In: _____. (Ed.). **Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana**. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, 2010. p. 55-64.
- VIEIRA, S. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, June 1983.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2000. v. 1, p. 1-54.
- WANG B.H.; JIN, L.; WANG, B. **Improvement of soil nutrient management via information technology**. Better Crops, Norcross, v.90, n.3, p.30-2, 2006.

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

WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SCHIMANDEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 338-343, abr. 2006.

YANG, C. et al. Spacial variability in yields e profits within ten grain sorghum fields in south Texas. **American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 45, n. 4, p. 897-906, Apr. 2002.