



LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE
AMOSTRAL ÓTIMA PARA A GERAÇÃO DE
MAPAS TEMÁTICOS NA CAFEICULTURA DE
PRECISÃO**

LAVRAS - MG

2016

LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE AMOSTRAL ÓTIMA PARA A
GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS NA CAFEICULTURA DE
PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva
Orientador

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Coorientador

LAVRAS - MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Carvalho, Luis Carlos Cirilo.

Determinação da densidade amostral ótima para a geração de
mapas temáticos na cafeicultura de precisão / Luis Carlos Cirilo
Carvalho. – Lavras : UFLA, 2016.

230 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: Fábio Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Café. 3. Malhas amostrais. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE AMOSTRAL ÓTIMA PARA A
GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS NA CAFEICULTURA DE
PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 20 de Abril de 2016.

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves UFLA

Dr. Rogner Carvalho Avelar

Prof. Dr. Mauricio Santana Moreau UESC

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz UFLA

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS - MG

2016

DEDICO

***À minha esposa, Juliana,
a meus pais, Alberto e Elaine,
a meus avós, Geraldo e Amélia,***

***O amor e o apoio (e a paciência) de todos vocês, ao longo dos anos, foram o
combustível que tornou essa conquista possível!!!***

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade de cursar a pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro por determinado período de tempo.

Ao professor Dr. Fábio Moreira da Silva, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz, pela coorientação e contribuições.

Aos professores do DEG, por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso.

Ao proprietário da fazenda Brejão, Eric Miranda Abreu, por ceder a área experimental e disponibilizar seus funcionários, permitindo a realização do trabalho em sua propriedade.

Aos meus amigos, que me auxiliaram na coleta de dados, Vanessa Figueiredo, João Barreto Cunha, Rodrigo Dias, Luiz Gonzaga Junior, Leandro Alvarenga Santos e Lucas Ambrosano.

Aos funcionários do DEG, em especial à secretária da pós-graduação em Engenharia Agrícola, Helem Cristina Carmo.

RESUMO

Dentre as culturas agrícolas exploradas comercialmente no Brasil, o café tem uma grande importância econômica, principalmente para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Na busca por maiores produtividades e menor impacto ambiental, produtores rurais e pesquisadores, cada vez mais, buscam desenvolver novas tecnologias que resultem em maior eficiência nos diversos processos produtivos do cafeeiro. Para isso, a adoção da agricultura de precisão no gerenciamento das operações nas lavouras cafeeira, chamada de cafeicultura de precisão, tem demonstrado resultados que justifiquem a sua utilização, por meio da identificação da variabilidade espacial de diversas variáveis, permitindo o seu manejo localizado e na intensidade adequada. Ao contrário do manejo convencional, que se baseia na média de observações em uma área, a agricultura de precisão utiliza uma amostragem mais detalhada, baseada em uma malha amostral, que permite representar com maiores detalhes a realidade da lavoura. Muitos estudos já realizados permitiram identificar a variabilidade espacial de variáveis do sistema produtivo do café, mas sem se preocupar com a qualidade das informações obtidas em função da malha de amostragem utilizada, como precisão e exatidão. Diante do exposto, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a qualidade de quatro diferentes malhas de amostragem para diferentes variáveis e em três épocas, com a finalidade de identificar qual a malha mais adequada a ser utilizada em cafeicultura de precisão. Objetivou-se também comparar os resultados entre a cafeicultura de precisão e a convencional, em função de valores referenciais.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Café. Malhas amostrais. Geoestatística. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

Among the crops commercially exploited in Brazil, the coffee has a great economic importance, especially in the states of Minas Gerais and Espírito Santo. In the search for higher yield and lower environmental impact, farmers and researchers seek to develop new technologies that result in greater efficiency in various production processes of the coffee. For this, the adoption of precision agriculture in the management of operations in coffee crops, called precision coffee, has shown results that justify its use, by identifying the spatial variability of several variables, allowing its localized management and in the proper intensity. Unlike conventional management that is based on the average of observations in an area, precision agriculture uses a more detailed sampling, based on a sampling grid, which allows to represent in greater detail the reality of farming. Many previous studies have identified the spatial variability of the production of coffee system variables, but without worrying about the quality of information obtained due to the sampling grid used as precision and accuracy. Given the above, the objective of this study was to evaluate the quality of four different sampling grids for different variables and three times, in order to identify the most appropriate grid for use in precision coffee. Also aimed to compare the results between the precision coffee and conventional, according to reference values.

Keywords: Precision Agriculture. *Coffea arabica*. Grids. Geostatistics. Spatial variability.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Métodos de amostragem mais comuns em agricultura de precisão.....	32
--	----

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Levantamento planialtimétrico da Fazenda Brejão.....	51
Figura 2 - Croquis das malhas de amostragem avaliadas para utilização em cafeicultura de precisão.....	53
Figura 3 - Disposição das plantas para coleta de folhas para análise foliar.....	56
Figura 4 - Distribuição espacial do pH em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	88
Figura 5 - Distribuição espacial do pH em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	89
Figura 6 - Distribuição espacial do pH em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	90
Figura 7 - Distribuição espacial do K (mg/dm ³) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	91
Figura 8 - Distribuição espacial do K (mg/dm ³) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	92
Figura 9 - Distribuição espacial do K (mg/dm ³) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	93
Figura 10 - Distribuição espacial do P (mg/dm ³) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	94
Figura 11 - Distribuição espacial do P (mg/dm ³) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	95

Figura 12 - Distribuição espacial do P (mg/dm^3) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	96
Figura 13 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	97
Figura 14 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	98
Figura 15 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	99
Figura 16 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	100
Figura 17 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	101
Figura 18 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	102
Figura 19 - Distribuição espacial do Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	103
Figura 20 - Distribuição espacial do Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	104
Figura 21 - Distribuição espacial do Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	105
Figura 22 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	106
Figura 23 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	107
Figura 24 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	108
Figura 25 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	109

Figura 26 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	110
Figura 27 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	111
Figura 28 - Distribuição espacial da t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	112
Figura 29 - Distribuição espacial da t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	113
Figura 30 - Distribuição espacial da t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	114
Figura 31 - Distribuição espacial da T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	115
Figura 32 - Distribuição espacial da T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	116
Figura 33 - Distribuição espacial da T em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	117
Figura 34 - Distribuição espacial da V(%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	118
Figura 35 - Distribuição espacial da V(%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	119
Figura 36 - Distribuição espacial da V(%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	120
Figura 37 - Distribuição espacial da m(%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	121
Figura 38 - Distribuição espacial da m(%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	122
Figura 39 - Distribuição espacial da m(%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	123

Figura 40 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	124
Figura 41 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	125
Figura 42 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	126
Figura 43 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	127
Figura 44 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	128
Figura 45 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	129
Figura 46 - Distribuição espacial do N (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	130
Figura 47 - Distribuição espacial do N (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	131
Figura 48 - Distribuição espacial do N (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	132
Figura 49 - Distribuição espacial do P (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	133
Figura 50 - Distribuição espacial do P (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	134
Figura 51 - Distribuição espacial do P (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	135
Figura 52 - Distribuição espacial do K (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	136
Figura 53 - Distribuição espacial do K (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	137

Figura 54 - Distribuição espacial do K (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	138
Figura 55 - Distribuição espacial do Ca (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	139
Figura 56 - Distribuição espacial do Ca (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	140
Figura 57 - Distribuição espacial do Ca (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	141
Figura 58 - Distribuição espacial do Mg (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	142
Figura 59 - Distribuição espacial do Mg (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	143
Figura 60 - Distribuição espacial do Mg (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	144
Figura 61 - Distribuição espacial do S (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	145
Figura 62 - Distribuição espacial do S (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.....	146
Figura 63 - Distribuição espacial do S (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.....	147
Figura 64 - Distribuição espacial da produtividade do cafeeiro em 2012 para as diferentes malhas de amostragem.	148
Figura 65 - Distribuição espacial da produtividade do cafeeiro em 2013 para as diferentes malhas de amostragem.	149

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Croqui da área experimental para a cafeicultura de precisão - malha de 46 pontos.....	164
--	-----

Figura 2 - Croqui da área experimental para o manejo convencional.....	164
Figura 3 - Distribuição espacial do pH e K (mg.dm ⁻³) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13	195
Figura 4 - Distribuição espacial do P (mg.dm ⁻³) e Ca(cmol _c .dm ⁻³) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13	198
Figura 5 - Distribuição espacial do Mg (cmol _c .dm ⁻³) e Al (cmol _c .dm ⁻³) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13	201
Figura 6 - Distribuição espacial do H+Al (cmol _c .dm ⁻³) e SB (cmol _c .dm ⁻³) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.	204
Figura 7 - Distribuição espacial da t (cmol _c .dm ⁻³) e T (cmol _c .dm ⁻³) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.	206
Figura 8 - Distribuição espacial do V (%) e m (%) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13	209
Figura 9 - Distribuição espacial da M.O. (dag.Kg ⁻¹) e do P-rem (mg.L ⁻¹) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13	211
Figura 10 - Distribuição espacial do teor de N (%) e teor de P (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.....	214
Figura 11 - Distribuição espacial do teor de K (%) e teor de Ca (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.....	216
Figura 12 - Distribuição espacial do teor de Mg (%) e teor de S (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.....	218
Figura 13 - Distribuição espacial da produtividade (L/planta) do café em 2012 e 2013	220

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 3

- Gráfico 1 - Semivariogramas ajustados para as variáveis coletadas em Jun/12: pH; K (mg.dm^{-3}); P (mg.dm^{-3}); Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg^{-1}); P-rem (mg.L^{-1})..... 185
- Gráfico 2 - Semivariogramas ajustados para as variáveis coletadas em Dez/12 pH; K (mg.dm^{-3}); P (mg.dm^{-3}); Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg^{-1}); P-rem (mg.L^{-1})..... 186
- Gráfico 3 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de solo em Jun/13: pH; K (mg.dm^{-3}); P (mg.dm^{-3}); Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg^{-1}); P-rem (mg.L^{-1})..... 187
- Gráfico 4 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Jun/12: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)..... 188
- Gráfico 5 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Dez/12: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)..... 189
- Gráfico 6 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Jun/13: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)..... 190
- Gráfico 7 - Semivariogramas ajustados para a produtividade (L/planta) do café em 2012 (esquerda) e em 2013 (direita) 191

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 3

Quadro 1 - Coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, para as variáveis de fertilidade do solo em diferentes épocas de amostragem.....	192
Quadro 2 - Coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, para as variáveis de fertilidade do solo em diferentes épocas de amostragem.....	212

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

- Tabela 1 - Classificação das malhas amostrais, seus respectivos número de pontos georreferenciados e relação quantidade de pontos por hectare54
- Tabela 2 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral. 60
- Tabela 3 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral. 61
- Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral. 62
- Tabela 5 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para dados o T, V e m, determinados pela análise de solo, referentes à coleta em junho 2012, e resultados da avaliação da malha amostral..... 63
- Tabela 6 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em de junho 2012, e resultados da avaliação da malha amostral. 64

Tabela 7 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	65
Tabela 8 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	66
Tabela 9 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	67
Tabela 10 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o T, V e m, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	68
Tabela 11 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	69
Tabela 12 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários,	

	para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.	70
Tabela 13 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.	71
Tabela 14 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.	72
Tabela 15 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o T, V e m, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.	73
Tabela 16 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.	74
Tabela 17 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do N, P e K determinados pela análise foliar, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.	75
Tabela 18 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.	76
Tabela 19 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do	

	N, P e K determinados pela análise foliar, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	77
Tabela 20 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.....	78
Tabela 21 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do N, P e K, determinados pela análise foliar, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.....	79
Tabela 22 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.....	80
Tabela 23 -	Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a produtividade do cafeeiro, em 2012 e 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.....	81
Tabela 24 -	Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, para a fertilidade do solo, para junho/2012, dezembro/2012, junho/2013, e para a média das três épocas.....	83
Tabela 25 -	Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, para a análise foliar, para junho/2012, dezembro/2012, junho/2013, e para a média das três épocas.....	83
Tabela 26 -	Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio para a produtividade do cafeeiro em 2012, 2013 e média dos dois anos.....	84

Tabela 27 - Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, considerando todas as variáveis (fertilidade do solo, análise foliar e produtividade do cafeeiro) e todas as épocas de coleta.....	84
--	----

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica.....	167
Tabela 2 - Padrões referenciais médios para avaliação de resultados de análise foliar do cafeeiro.	167
Tabela 3 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	171
Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em dezembro de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	172
Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2013, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	173
Tabela 6 - Classificação dos valores médios das variáveis de fertilidade do solo, resultantes da amostragem convencional e da	

	cafeicultura de precisão - CP (Média - n = 46), de acordo com Alvarez et al. (1999).....	174
Tabela 7 -	Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	175
Tabela 8 -	Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em dezembro de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	175
Tabela 9 -	Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2013, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	176
Tabela 10 -	Classificação dos valores médios das variáveis da nutrição foliar, resultantes da amostragem convencional e cafeicultura de precisão - CP (Média - n = 46), de acordo com a Fundação Procafé (2015).	177
Tabela 11 -	Estatística descritiva da produtividade das plantas de café (L/planta), em 2012 e 2013, provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.	178
Tabela 12 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados	

	mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em junho de 2012.	180
Tabela 13 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em dezembro de 2012.....	181
Tabela 14 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em junho de 2013.	182
Tabela 15 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em junho de 2012.....	183
Tabela 16 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em dezembro de 2012.....	183
Tabela 17 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em junho de 2013.....	184
Tabela 18 -	Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para a produtividade das plantas de café, para 2012 e 2013.	184
Tabela 19 -	Coeficientes de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, das variáveis de junho de 2012 e de 2013 que apresentaram	

correlação significativa com a produtividade do cafeeiro para
os anos de 2012 e 2013221

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	27
1	INTRODUÇÃO	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	Malhas de amostragem	30
2.2	Densidade de amostragem em malha para a cafeicultura de precisão	32
2.3	Geoestatística	35
2.3.1	Semivariograma	36
2.3.2	Validação cruzada	37
2.3.3	Krigagem	38
2.3.4	Criação de mapas temáticos	40
	REFERÊNCIAS	41
	CAPÍTULO 2 Determinação de densidade de amostragem para uso em cafeicultura de precisão	47
1	INTRODUÇÃO	49
2	MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1	Caracterização da área experimental	51
2.2	Georreferenciamento de pontos amostrais	52
2.3	Malhas amostrais avaliadas	52
2.4	Coleta dos dados	54
2.4.1	Fertilidade do solo	54
2.4.2	Nutrição Foliar	55
2.4.3	Produtividade do cafeeiro	56
2.5	Análise e processamento dos dados	56
2.5.1	Identificação da dependência espacial	56
2.5.2	Avaliação das malhas amostrais	57
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.1	Análise geoestatística e determinação dos índices de exatidão, índice de precisão e indicador de malha ótima	59
3.1.1	Uso do indicador de malha ótima no gerenciamento das operações de coleta	82
3.1.2	Distribuição espacial das variáveis em função das malhas de amostragem	87
4	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	153
	CAPÍTULO 3 Cafeicultura de precisão na identificação da variabilidade espacial de variáveis agronômicas, em três épocas ...	157
1	INTRODUÇÃO	159
2	MATERIAL E MÉTODOS	163

2.1	Caracterização da área experimental	163
2.2	Coleta de dados	163
2.2.1	Coleta de amostras de solo	165
2.2.2	Coleta de amostras foliares	165
2.2.3	Coleta de frutos para estimação da produtividade do cafeeiro	166
2.3	Análise e processamento dos dados	166
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	169
3.1	Estatística descritiva	169
3.2	Análise geoestatística	178
3.3	Mapas temáticos e comparação com a amostragem convencional, em função de valores de referência	191
3.3.1	Fertilidade do solo	191
3.3.2	Análise foliar	212
3.3.3	Produtividade do café	219
3.3.4	Parecer entre a cafeicultura de precisão e a amostragem convencional	223
4	CONCLUSÕES	225
	REFERÊNCIAS	227

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas de maior importância do agronegócio brasileiro, principalmente para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Inovações tecnológicas em todas as fases de produção do café vêm sendo desenvolvidas e avaliadas por pesquisadores e produtores rurais, a fim de tornar o cultivo do café mais competitivo no mercado, por meio de baixo custo de produção, obtenção de produtividades ótimas e reduzido impacto ambiental. Para tanto, destaca-se a agricultura de precisão, que permite identificar na lavoura os locais em que são necessários manejos específicos.

Utilizando técnicas de agricultura convencional não é possível observar a amplitude de valores que uma variável pode apresentar ao longo de uma área. Os mapas temáticos criados pela agricultura de precisão permitem que o produtor rural possa realizar o manejo de sua propriedade de acordo com a variabilidade espacial existente. Dessa forma, é possível planejar a quantidade de insumos (defensivos agrícolas, adubos e corretivos) a serem adquiridos, o período e o local de iniciar a colheita, bem como a logística da pós-colheita.

Apesar da potencialidade de uso, ainda é necessário o desenvolvimento de mais estudos em variáveis do sistema solo-planta-atmosfera que influenciam o desenvolvimento do cafeeiro, com o objetivo de comprovar a viabilidade técnica e econômica da adoção da agricultura de precisão em lavouras cafeeiras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A produtividade das lavouras é significativamente afetada por fatores relacionados com o sistema solo-planta-atmosfera, os quais podem variar no espaço e no tempo. Para tornar a atividade agrícola competitiva e mais eficiente, o conhecimento e o gerenciamento detalhado destes fatores se tornam necessários, pelo fato de essas áreas agrícolas serem extensas e, por isso, de modo geral, não são uniformes.

Portanto, é preciso utilizar ferramentas que identifiquem essa variabilidade existente nos diversos sistemas produtivos e que realizem ações adequadas para manejá-la. Dessa maneira, produtores rurais têm adotado cada vez mais a agricultura de precisão (AP) para a tomada de decisões em suas propriedades.

Segundo definição do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2013), a agricultura de precisão é um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando o aumento de retorno econômico e à redução do impacto ao ambiente. Dessa forma, o produtor rural tem um conhecimento específico sobre a lavoura e pode estabelecer estratégias de manejo mais eficientes.

A gestão das intervenções econômicas pode ser fundamentada em algumas vertentes, sendo uma delas aumentar a produtividade, com possível incremento dos custos, dentro dos limites do conceito econômico da lucratividade. Outra estratégia é a redução de custos, com diminuição do uso de insumos por meio da sua racionalização guiada pela variabilidade espacial (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). Costa e Guilhoto (2015) avaliando possíveis cenários da adoção de AP no Brasil, afirmam que se os benefícios ocorrerem sobre o aumento da produtividade, acarretaria em aumento de empregos e renda para a economia. Já se o benefício for apenas na redução de

insumos em função da variabilidade espacial, apesar de aumentar o lucro do produtor rural, os benefícios para a economia como um todo não ocorrem e a vantagem da técnica deve ser analisada no sentido de redução da poluição ambiental.

Diante disso, faz-se necessário o aumento da eficiência das etapas da produção agrícola. Para tanto, estão disponíveis no mercado tecnologias que permitem identificar e manejar a variabilidade espacial, por meio de sensoriamento remoto (MOLIN et al., 2010; MOTOMIYA; MOLIN; CHIAVEGATO, 2009; ZANZARINI et al., 2013), aplicação de insumos em taxa variável (FIGUEIREDO; ANTUNIASSI, 2006; MILLER, 2004; WERNER et al., 2007), acurácia de operações mecanizadas (BAIO; MORATELLI; RODRIGO, 2011; MOLIN et al. 2011), e amostragem em malha para diferentes especificidades (ARMINDO et al., 2012; CORTEZ et al., 2014; GUIMARÃES et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2012; SOUZA et al., 2015).

Diante do exposto, buscou-se, neste referencial teórico, explicar a utilização da AP em lavouras cafeeiras no Brasil. Para tanto, realizou-se uma pesquisa, na literatura especializada, de trabalhos científicos que apresentem resultados para comprovar a eficiência da adoção da cafeicultura de precisão, para diferentes finalidades. Explicou-se também a técnica de geoestatística.

2.1 Malhas de amostragem

O método tradicional de amostragem para a agricultura convencional, baseado em uma única amostra composta representando toda uma área, não é capaz de identificar toda a variabilidade existente para determinada variável. No caso da fertilidade do solo, por exemplo, a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999) recomenda retirar em torno de 20 amostras simples, coletadas em zigzag, até limitar a área homogênea (área não superior a 10 hectares), para fazer uma amostra composta com cerca de 200

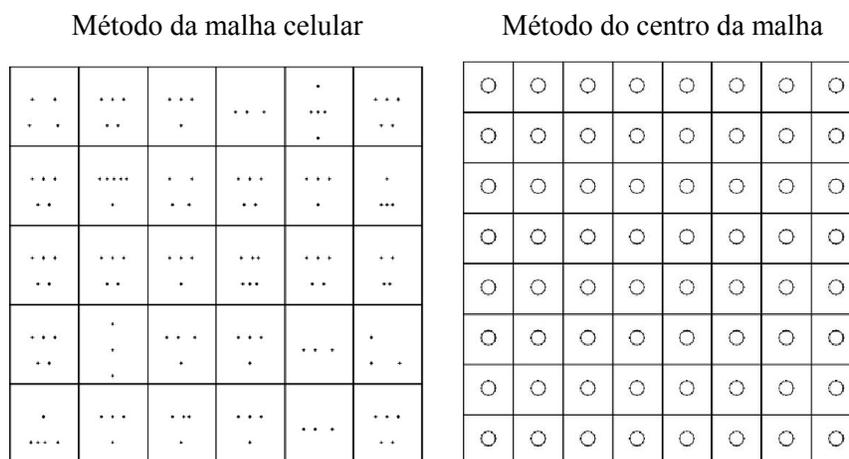
a 300 g de solo, representando toda a área correspondente. Entretanto, Furtini Neto et al. (2001) afirmam que diversos fatores influenciam a dinâmica dos nutrientes no solo, condicionando a capacidade do solo de ele suprir as plantas desses nutrientes, cuja disponibilidade é variável no espaço e tempo. Para conhecer a variabilidade espacial, é preciso realizar amostragens mais detalhadas e utilizar ferramentas estatísticas que considerem a relação espacial destas variáveis.

Para a AP, a coleta de dados é realizada em campo com as correspondentes coordenadas geográficas. São criadas malhas amostrais, que dividem a área em seções menores onde são coletados os dados, baseando-se no princípio de que estas seções tendem a ser homogêneas. Para tanto, é preciso planejar a quantidade de pontos a serem amostrados, uma vez que mais pontos de coleta resultam em maiores custos e maior tempo de aquisição e processamento dos dados.

Os métodos de amostragem mais comuns em AP estão apresentados na Figura 1 e são divididos em dois: malha celular e centro de malha (MYLAVARAPU; LEE, 2014). O método da malha celular divide a área em células e, no interior destas, são retiradas subamostras aleatórias que, posteriormente, formarão uma amostra composta correspondente à célula. Neste caso, a coleta de dados pode ser demorada, devido à retirada individual de amostras ao longo de cada célula, sendo este método mais recomendado para grandes áreas. O método do centro de malha representa um ponto, geralmente no centro da malha, em que as subamostras são retiradas em um raio de três a seis metros para formar a amostra composta. Esse método permite criar mapas temáticos, uma vez que é possível interpolar valores entre os pontos amostrados. Quanto menor o tamanho da malha, maior a densidade amostral e, conseqüentemente, maiores os custos de coleta e processamento de amostras,

além de consumir mais tempo. Neste trabalho foi utilizado o método do centro da malha.

Figura 1 - Métodos de amostragem mais comuns em agricultura de precisão.



Fonte: Adaptado de Mylavarapu e Lee (2014)

2.2 Densidade de amostragem em malha para a cafeicultura de precisão

No caso específico da cafeicultura, Alves, Queiroz e Pinto (2006) sugerem o termo cafeicultura de precisão (CP) quando técnicas de AP são utilizadas na produção de café. Pode-se ainda definir cafeicultura de precisão, segundo Ferraz et al. (2012c), como o conjunto de técnicas e tecnologias capazes de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade, aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto.

Trabalhos científicos foram realizados para comprovar o uso da CP no gerenciamento das diversas operações agrícolas existentes no agronegócio do café. Em lavouras de café (*Coffea arabica* L.), no município de Ijaci, sul de Minas Gerais, foi identificada a variabilidade espacial de atributos químicos do

solo e da produtividade, por meio das densidades amostrais: aproximadamente 16 pontos por hectare (SILVA et al., 2007), aproximadamente 11 pontos por hectare (SILVA et al., 2008); e aproximadamente 10 pontos por hectare (SILVA, F. et al., 2010). Para obtenção da produtividade, foi feita a derriça manual no pano de quatro plantas ao redor do ponto amostral, sendo utilizado o valor médio da produtividade por planta.

Por meio de um quadriciclo equipado com calador e colheita manual sobre panos, Ferraz et al. (2012a) identificaram a dependência espacial do fósforo, potássio e produtividade de uma lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.), com 22 hectares, em Três Pontas, Minas Gerais. Para tanto, os autores propuseram uma malha irregular de 54 pontos (densidade amostral de aproximadamente 2,45 pontos por hectare). Para esta mesma propriedade, Ferraz et al. (2012b) utilizaram uma malha de 48 pontos, que equivalem a uma densidade amostral de 2,18 pontos por hectare, na avaliação da produtividade e da força de desprendimento de frutos do cafeeiro, a fim de auxiliar os produtores rurais quanto aos locais e momentos adequados para a colheita mecanizada, resultando em aumento do lucro e na melhor qualidade do café colhido. Com o objetivo de realizar adubação de fósforo e potássio diferenciada, Ferraz et al. (2015) utilizaram uma malha com intervalos regulares a cada 57 m (densidade amostral de aproximadamente três pontos por hectare), ainda para a propriedade em Três Pontas. Dessa forma, foi possível a criação de mapas temáticos, bem como verificar as diferenças apresentadas pelas adubações quando comparadas com o manejo convencional, com base em valores médios observados.

Realizando estudos em uma lavoura de café (*Coffea arabica* L.) de 10,52 ha, Carvalho et al. (2013) propuseram o uso de uma malha irregular de 24 pontos, densidade amostral de 2,3 pontos por hectare, na avaliação de variáveis físicas do solo indicadoras de compactação, bem como da produtividade. A

menor distância entre dois pontos da malha era de 39,0 metros. Os autores puderam identificar a dependência espacial para todas as variáveis.

Para identificar a variabilidade espacial do ataque das pragas bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) e broca-dos-frutos (*Hypothenemus hampei*) em diferentes épocas, Alves et al. (2009) utilizaram uma malha de 67 pontos de coleta em 6,6 hectares (densidade amostral de aproximadamente 10,15 pontos por hectare) de uma lavoura em Ijaci, sul do Estado de Minas Gerais.

No estudo da variabilidade espacial de atributos químicos do solo de uma lavoura cultivada com café no município de Reduto, leste de Minas Gerais, Silva, S. et al. (2010) utilizaram 50 pontos distribuídos de forma irregular na área.

A variabilidade espacial do estado nutricional do cafeeiro *canephora* no município de Cachoeira do Itapemirim, Sul do Espírito Santo, foi avaliada por Oliveira et al. (2010), com a utilização de 60 pontos de coleta distribuídos de forma irregular em um hectare. Com exceção dos teores foliares de K e B, os demais apresentaram dependência espacial. Ainda nesta propriedade, Fonseca et al. (2015) avaliaram a produtividade e o estado nutricional do cafeeiro *canephora*, por meio de uma malha irregular de 140 pontos. Utilizando uma malha de irregular de 109 pontos, para a mesma propriedade já citada, Lima et al. (2014) avaliaram a variabilidade espacial e temporal da produtividade do cafeeiro *canephora*.

Para o estudo da variabilidade espacial da maturação dos frutos, foram utilizadas malhas de 128 pontos para um hectare (OLIVEIRA, 2003) e de 60 pontos por hectare (ALVES, 2009).

Como visto, a cafeicultura de precisão vem sendo adotadas em variáveis distintas do sistema produtivo do café. Percebe-se que os estudos citados possuem diferenças em relação à densidade de amostragem utilizada, principalmente em relação à quantidade e à distância de coleta entre os pontos

de amostragem. Mesmo assim, todos identificaram dependência espacial de variáveis da lavoura cafeeira nas áreas estudadas, mas não se importaram com a qualidade das malhas amostrais, em relação à exatidão e à precisão.

2.3 Geoestatística

Com a finalidade de identificar e quantificar a dependência espacial de uma variável, é utilizada a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). Os principais fundamentos da geoestatística surgiram na África do Sul, em 1951, quando o engenheiro de minas Daniel Krige, por meio de observações das minas de ouro do Rand, percebeu a necessidade de considerar a distância entre as amostras coletadas, a fim de dar sentido às variâncias encontradas. Os estudos iniciais de geoestatística transformaram-na em um instrumento de avaliação de jazidas minerais (ANDRIOTTI, 2003; VIEIRA, 2000). Em 1963, o francês George Matheron combinou estes princípios de geoestatística com fundamentos da estatística convencional, criando a teoria das variáveis regionalizadas. Matheron define variável regionalizada como sendo uma função espacial numérica que varia de um local para o outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples (VIEIRA, 2000). Dessa maneira, por meio da geoestatística avalia-se a dependência espacial, utilizando-a para interpolar valores para locais não medidos. Com isto se produzem informações para construir mapas contínuos a partir da amostragem discretizada e para estruturar amostragens em função da variabilidade espacial (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

Para Andriotti (2003), as técnicas geoestatísticas são utilizadas para descrever e modelizar padrões espaciais (variografia), para predizer valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar

malhas de amostragem. A geoestatística é baseada em dois conceitos: o semivariograma e a krigagem

2.3.1 Semivariograma

Seja uma variável regionalizada $x(i)$ coletada em diversos pontos irregularmente distribuídos por certa região. O valor de cada ponto está relacionado, de algum modo, com valores obtidos a partir de pontos situados a certa distância h , sendo razoável pensar que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos (LANDIM, 2006). O semivariograma representa o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes na área estudada, tomados a uma distância h uns dos outros. Indica quão díspares se tornam os valores da variável, quando a distância de medida entre as amostras aumenta (ANDRIOTTI, 2003).

O semivariograma descreve o grau de dependência entre amostras em função da direção e da distância de separação da coleta dessas amostras, além de estabelecer os parâmetros exigidos para a estimativa da variável nos locais em que não foi feita amostragem, por meio do uso da krigagem.

Isso significa que o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância h . Tal variabilidade pode ser bastante diferente quando consideradas diferentes direções (LANDIM, 2006). Andriotti (2003) afirma que quando há dependência da magnitude da distância e da direção, considera-se que o fenômeno é anisotrópico e, quando a dependência é apenas da magnitude da distância, chama-se isotrópico. No caso do presente trabalho, considerou-se apenas dependência isotrópica.

O semivariograma clássico (VIEIRA, 2000) é estimado de acordo com a Equação 1:

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

Em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O semivariograma é representado pelo Gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h .

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmicas nessas aplicações. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Nos trabalhos de geoestatística, os principais modelos utilizados são o esférico, o exponencial e o gaussiano (VIEIRA, 2000).

Os parâmetros efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e alcance (a) são, respectivamente, o efeito pepita, a variância estrutural e o alcance e são usados para ajustar o modelo ao semivariograma. O C_0 é o valor da semivariância para a distância zero e representa a 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 (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; VIEIRA, 2000).

O valor em que a semivariância estabiliza é denominado patamar (C_0+C_1) e o valor de h em que essa estabilidade ocorre é chamado de alcance. O alcance representa a zona de influência de uma observação e separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes) (ANDRIOTTI, 2003), definindo o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para a interpolação por krigagem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

2.3.2 Validação cruzada

Uma vez escolhido o modelo teórico de correlação espacial, resta saber se ele é eficiente para interpolar valores, permitindo estimativas confiáveis para

a construção de mapas temáticos (CRESSIE, 1985 apud FARACO et al., 2008). A validação cruzada é utilizada, segundo Isaaks e Srivastava (1989), para comparar os valores amostrados com os valores preditos, avaliando os erros da estimativa realizada. O valor referente a um dado ponto é retirado, temporariamente, e é feita a interpolação do seu valor utilizando-se os valores dos demais pontos. Dessa forma, obtém-se alguns dados para a escolha do melhor modelo, como: erro médio, erro médio reduzido, desvio padrão dos erros médios, e desvio padrão dos erros médios reduzidos. O melhor modelo será o que apresentar: erro médio e erro médio reduzido mais próximos de zero; desvio padrão dos erros médios menor possível; e desvio padrão dos erros médios reduzidos mais próximo de um (CRESSIE, 1993).

2.3.3 Krigagem

A krigagem foi desenvolvida por George Matheron, que foi quem propôs o nome para homenagear Daniel Krige. Trata-se do método de interpolação usado para prever valores para locais em que a amostragem não foi realizada, utilizando-se a dependência espacial caracterizada pelo semivariograma entre amostras coletadas próximas. É considerada como um interpolador excelente, por obedecer a duas condições que são possuir variância mínima e ser não tendencioso. A condição de variância mínima indica que as diferenças que ocorrem ponto a ponto entre o valor predito e o observado são mínimas. Quanto à condição de não possuir tendência, indica que a diferença do valor predito e do valor observado em um ponto é nula. Ela leva em consideração: o número de amostras utilizadas; as posições das amostras na área a ser avaliada; as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada; e a continuidade espacial da variável em estudo (ANDRIOTTI, 2003).

De acordo com Vieira (2000), para estimar valores, Z^* , para qualquer local, x_0 , em que não se têm valores medidos, e que a estimativa deve ser uma combinação linear dos valores medidos, ou seja:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

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

Para que o estimador seja ótimo, ele não pode ser tendencioso (equação dois) e deve ter variância mínima (equação três), ou seja:

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x)\} = 0$$

$$Var\{Z^*(x) - Z(x)\} = E\{[Z^*(x) - Z(x)]^2\} = \text{mínima}$$

Portanto, para que a estimativa não tenha tendência, é necessário que a soma dos pesos seja igual a um, qualquer que seja a distribuição de seus valores.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Se a soma dos pesos for igual a 1 e não ocorrer tendência local dos valores, esse estimador é o melhor e não tendencioso, pois a partir dos pesos atribuídos a cada amostra, minimiza a estimativa da variância. Como se têm apenas n incógnitas desconhecidas, introduz-se uma outra, também desconhecida, para balancear o sistema, ou seja, o chamado multiplicador de Lagrange, u (LANDIM, 2006). Assim, o sistema de krigagem fica como apresentado a seguir, podendo-se, então, calcular os pesos λ_i .

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + u = \gamma(x_i, x); i = 1 \text{ a } N$$

2.3.4 Criação de mapas temáticos

Após a interpolação por krigagem, os resultados são submetidos à espacialização, resultando em mapas de isolinhas, geralmente em ambientes de sistema de informação geográfica, em que outras bases podem ser visualizadas e agrupadas (imagem de satélite e mapas de relevo, hidrografia, entre outras) (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

Os mapas temáticos criados permitem que o produtor rural tenha um conhecimento detalhado de sua lavoura ao identificar locais em que a variável avaliada apresenta maior variabilidade ou uniformidade. Do ponto de vista do gerenciamento de operações agrícolas, essa informação permite que as práticas de manejo sejam realizadas nos locais corretos e na intensidade adequada.

Dessa forma, a utilização das tecnologias como a Geoestatística permite amparar tecnicamente decisões estratégicas e complexas em relação ao sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e na produtividade das diferentes culturas. Essa é a contribuição da geoestatística para o desenvolvimento de uma produção agrícola sustentável em agricultura de precisão (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

REFERÊNCIAS

ALVES, E. A. **Variabilidade espacial e temporal da qualidade do café cereja produzido na região das Serras de Minas**. 2009. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C. Cafeicultura de precisão. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 189-223.

ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.

ARMINDO, R. A. et al. Spatial variability of leaf nutrient contents in a drip irrigated citrus orchard. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 479-489, 2012.

BAIO, F.; MORATELLI, H. R.; RODRIGO, F. Avaliação da acurácia no direcionamento com piloto automático e contraste da capacidade de campo operacional no plantio mecanizado da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 367-375, 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Brasília, 2013. 36 p.

CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.

CORTEZ, J. W. et al. Spatial variability of mechanical resistance to penetration evaluated with mobile unit on haplic vertisol cultivated with mango. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 244-253, 2014.

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. Impactos potenciais da agricultura de precisão sobre a economia brasileira. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 306-312, 2015.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 463-476, mar./abr. 2008.

FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012a.

_____. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012b.

_____. Variabilidade espacial da dose de P_2O_5 e K_2O para adubação diferenciada e convencional em lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 346-356, jul./set. 2015.

_____. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012c.

_____. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.

FIGUEIREDO, Z. N.; ANTUNIASSI, U. R. Uso de controladores lógico programáveis para ensaios de avaliação de sistemas de controle eletrônico para pulverizadores. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 134-146, 2006.

FONSECA, A. S. et al. Spatial variability of the productivity and the nutritional condition of coffee canephora. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 420-428, 2015.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. p. 74-83.

GUIMARÃES, R. M. L. et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 657-669, jul./ago. 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LIMA, J. S. S. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade do cafeeiro canephora. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 400-407, 2014.

MILLER, W. M. et al. Evaluating variable rate granular fertilizer technologies in Florida citrus. **Proceedings of Florida State Horticultural Society**, Lake Alfred, v. 117, p. 161-166, 2004.

MOLIN, J. P. Método de avaliação de equipamentos para direcionamento de veículos agrícolas e efeito de sinais GNSS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 121-129, jan./fev. 2011.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 294 p.

MOLIN, J. P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1345-1349, 2010.

MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; CHIAVEGATO, E. J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 137-145, 2009.

MYLAVARAPU, R. S.; LEE, W. D. **UF/IFAS nutrient management series: soil sampling strategies for precision agriculture**. Gainesville: IFAS Extension, University of Florida, 2014. Disponível em: <<https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/SS/SS40200.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

OLIVEIRA, A. S. C. **Mapeamento da variabilidade espacial da produção na cafeicultura de montanha**. 2003. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 69-79, 2012.

OLIVEIRA, R. B. et al. Spatial variability of the nutritional condition of canephora coffee aiming specific management. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 190-196, 2010.

SILVA, F. M. da et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.

_____. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

_____. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 15-22, 2010.

SOUZA, R. M. S. et al. Evaluation of the spatial dependence of dendrometric characteristics for an *Eucalyptus plantation*. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 4, p. 483-488, 2015.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, Feb. 1985.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

WERNER, V. et al. Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 658-663, dez. 2007.

ZANZARINI, F. V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608-614, jun. 2013.

CAPÍTULO 2 DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE DE AMOSTRAGEM PARA USO EM CAFEICULTURA DE PRECISÃO

RESUMO

Apesar da adoção cada vez maior de técnicas de agricultura de precisão no gerenciamento de lavouras, existem muitas dúvidas em relação aos procedimentos de amostragem a serem utilizados. É comum no Brasil a utilização de malhas regulares, mas ainda é preciso determinar o tamanho destas. Diante do exposto, objetivou-se no presente trabalho avaliar quatro malhas de amostragem (meio ponto por hectare, um ponto por hectare, dois pontos por hectare e três pontos por hectare) na caracterização de variáveis da análise da fertilidade do solo, da nutrição foliar e da produtividade, de três épocas de amostragem. Para tanto, determinaram-se o índice de exatidão, o índice de precisão e o indicador de malha ótima (IMO) de cada malha, para cada variável. Para a fertilidade do solo e análise foliar, o IMO apontou como melhor a utilização de dois pontos de amostragem por hectare. Com base na média de todos os dados, o IMO recomenda a retirada de dois pontos por hectare para a cafeicultura de precisão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Cafeeiro. Malhas de amostragem; Geoestatística. Fertilidade do solo. Análise foliar.

ABSTRACT

Despite the increasing adoption of precision agriculture techniques in managing crops, there are many doubts about the sampling procedures to be used. It is common in Brazil to use regular grid, but still need to determine the size of these. The aim of the present study was to evaluate four sampling grids (half point per hectare, one point per hectare, two points per hectare and three points per hectare) in the analysis of variables of fertility of soil, foliar nutrition and yield, at three sampling times. Therefore, it was determined the index of accuracy, precision and indicator of optimal grid (IOG) of each grid, for each variable. For foliar and soil fertility analysis, as better pointed IOG two sampling points per hectare. Based on the average of all data, the IOG recommends the removal of two points per hectare for precision coffee.

Keywords: Precision agriculture. Coffee crop. Grid. Geostatistics; Soil fertility. Foliar analysis.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura no Brasil vem se tornando cada vez mais competitiva em função de elevadas produtividades, associada a uma cafeicultura moderna, com utilização apropriada de irrigação, mecanização, adubação e outras práticas agrícolas (FERNANDES et al., 2012). Dentre estas, a utilização da cafeicultura de precisão se torna cada vez mais comum entre produtores rurais. Alves, Queiroz e Pinto (2006) definem cafeicultura de precisão como o emprego de técnicas de agricultura de precisão na produção de café, em que se objetiva identificar a variabilidade espacial de variáveis do sistema produtivo.

O conhecimento da variabilidade espacial e temporal das propriedades dos solos e das culturas é considerado o princípio básico para o manejo preciso de lavouras (GREGO; VIEIRA, 2005). A geoestatística (VIEIRA, 2000) é utilizada para a análise da estrutura espacial dos atributos e, quando identificada, são gerados mapas temáticos por meio de interpolação por krigagem. Para tanto, o primeiro passo é utilizar uma amostragem adequada, na qual o número de pontos amostrais coletados seja suficiente para detectar a variabilidade espacial dos atributos a serem avaliados (MONTANARI et al., 2008).

A coleta de dados é comumente realizada utilizando-se malhas regulares (KERRY et al., 2010; WEBSTER; LARK, 2012), sendo a dependência espacial influenciada por alguns fatores, dentre os quais se destacam o tamanho da grade amostral e a variável avaliada (FLOWERS; WEISZ; WHITE, 2005; NANNI et al., 2011; RAGAGNIN; SENA JÚNIOR; SILVEIRA NETO, 2010). Relatos presentes em Cahn, Hummel e Brouer (1994) e Cambardella e Karlen (1999) afirmam que o tamanho da grade amostral correto ou a distância de amostragem a ser utilizada variam não somente pelo tamanho da área amostral, mas também pelas características das variáveis avaliadas. Portanto, o tamanho da grade amostral ótimo a ser utilizado, geralmente, é desconhecido antes da amostragem. Uma das maneiras de avaliar a qualidade dessas estimativas é por meio da

avaliação dos resultados da validação cruzada (RAGAGNIN; SENA JÚNIOR; SILVEIRA NETO, 2010).

A recomendação para as diversas culturas, de acordo com relato de Cherubin et al. (2014), é a de um ponto de coleta para um a três hectares, no mínimo e no máximo, respectivamente. A malha comercialmente utilizada na cafeicultura de precisão é a de um ponto para cada hectare, segundo Ferraz et al. (2012). Além dos aspectos científicos, também devem ser considerados o custo econômico e a praticidade no momento de escolher uma malha amostral, uma vez que um elevado custo de coleta e de processamento de dados inviabiliza a adoção da cafeicultura de precisão pelos proprietários rurais. É preciso aliar um número mínimo de pontos amostrados com uma máxima representação do local amostrado (mínima variância), otimizando o esquema de amostragem e barateando os custos (MONTANARI et al., 2005).

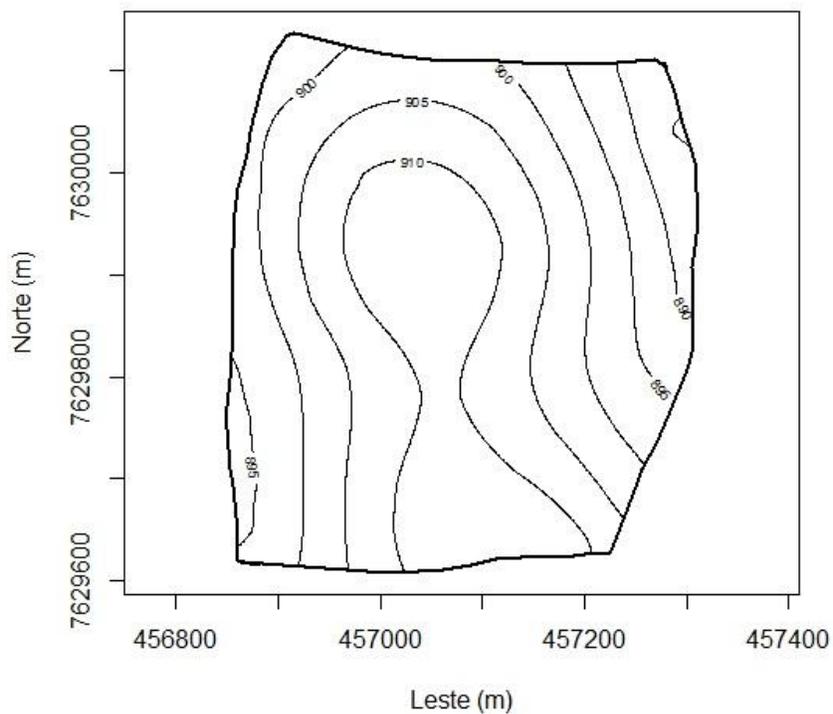
Diante do exposto, no presente trabalho, objetivou-se avaliar quatro malhas de amostragem, levando em consideração a fertilidade do solo, a nutrição foliar e a produtividade de uma lavoura de café arábica, permitindo identificar qual é a mais indicada a ser utilizada na cafeicultura de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na fazenda Brejão, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico - LVd, de textura argilosa, localizada no município de Três Pontas, no sul do Estado de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas médias 21°25'58 " de latitude Sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich, altitude máxima de 914,7 m. A área experimental tem 22 hectares cultivados com café (*Coffea arabica* L.) cultivar Topázio, tendo a lavoura sido implantada em 2005 no espaçamento 3,8 metros entre linhas e 0,8 metros entre plantas. Na Figura 1 apresenta-se o levantamento planialtimétrico da Fazenda Brejão.

Figura 1 - Levantamento planialtimétrico da Fazenda Brejão.



Excetuando as safras de 2007/2008 e 2008/2009 que receberam adubação diferenciada com base na variabilidade espacial conforme descrito por Ferraz et al. (2011), as demais safras foram manejadas da forma convencional. No manejo convencional, a lavoura é adubada em três épocas ao longo do ano: fevereiro, com 250 Kg/ha; outubro, com 500 Kg/ha de 20-05-20; e dezembro, com 350 Kg/ha de 25-00-25. A correção do solo é feita com aplicação de 1,0 tonelada/ha de calcário dolomítico, poder relativo de neutralização total - PRNT de 80%, no mês de agosto. É feita aplicação foliar de micronutrientes em agosto, outubro, dezembro e janeiro, nas dosagens de 0,6, 0,8, 0,8 e 0,6 L/ha. O controle de plantas daninhas é feito da seguinte forma: em Setembro, aplica-se 2,0 L/ha de Glifosato®; em dezembro e janeiro são realizadas as roçadas mecânicas. Para o controle de doenças aplica-se em agosto e janeiro 0,6 L/ha de Azimut®, em outubro e dezembro 0,8 L/ha de Guapo®.

2.2 Georreferenciamento de pontos amostrais

A área experimental foi georreferenciada por meio de um GPS geodésico Topcon FC-100 (Topcon Positioning Systems Inc, Livermore, Califórnia, EUA). Esse equipamento é composto por uma antena móvel, um computador portátil e uma antena posicionada em uma base fixa, para a correção dos dados. Criou-se uma malha regular de 64 pontos georreferenciados, espaçados a cada 57 metros. Essa distância foi utilizada para ajustar a malha às linhas de transplante do café, devido ao espaçamento de 3,8 metros entre as linhas, correspondendo a um ponto a cada 15 linhas.

2.3 Malhas amostrais avaliadas

A partir da malha de 64 pontos, pontos foram retirados, de forma sistemática, para criação de outras três malhas: 46 pontos, 23 pontos e 12 pontos. Foram avaliadas quatro malhas amostrais (Figura 2) aplicadas à variáveis da fertilidade do solo, nutrição foliar e produtividade de plantas. A classificação das

malhas, bem como a quantidade de pontos georreferenciados e a relação pontos por hectare, estão na Tabela 1.

Figura 2 - Croquis das malhas de amostragem avaliadas para utilização em cafeicultura de precisão

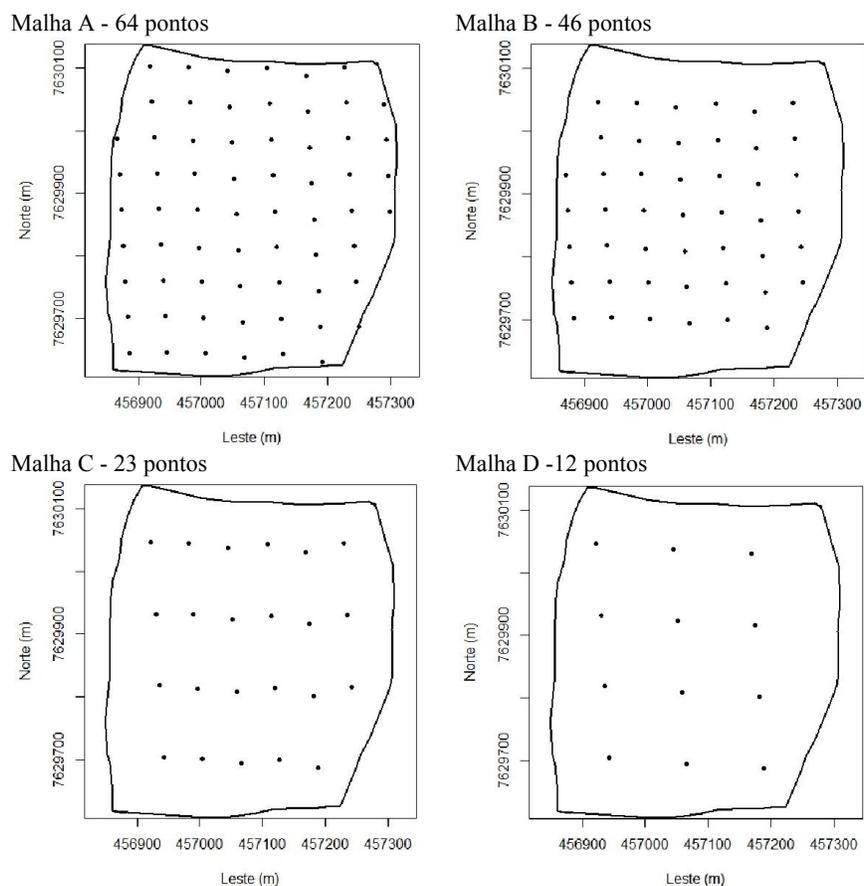


Tabela 1 - Classificação das malhas amostrais, seus respectivos número de pontos georreferenciados e relação quantidade de pontos por hectare

Malha amostral	Nº pontos georreferenciados	Nº pontos por hectare
A	64	3,0
B	46	2,0
C	23	1,0
D	12	0,5

Os mapas foram criados em coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) na zona 23K, por meio do datum SIRGAS2000.

2.4 Coleta dos dados

Os dados foram coletados nos 64 pontos amostrais georreferenciados. Foi realizada a amostragem do solo, da nutrição foliar e produtividade da lavoura.

2.4.1 Fertilidade do solo

Os dados de fertilidade do solo foram coletados em três épocas: junho de 2012; dezembro de 2012; e junho de 2013. Foram coletadas amostras de solo na camada de zero a vinte centímetros de profundidade, para determinação de: acidez ativa do solo - pH, potássio trocável - K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), fósforo - P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), cálcio trocável - Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), magnésio trocável - Mg ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), acidez trocável - Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), soma de bases - SB ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), CTC efetiva - t ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), CTC potencial - T ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), saturação por bases - V (%), saturação por alumínio - m (%), matéria orgânica - M.O. ($\text{dag}\cdot\text{Kg}^{-1}$), e fósforo remanescente - P-rem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Foi necessário um trado holandês, para a retirada das amostras, e um balde, utilizado para homogeneizá-las. As amostras de solo foram retiradas na projeção do terço externo da saia de quatro plantas de café, e posteriormente misturadas para a

retirada da amostra composta. Estas quatro plantas constituem-se: da planta referente ao ponto demarcado com o receptor GPS; uma planta ao lado na mesma linha; uma planta na linha de transplântio abaixo; e outra na linha de transplântio acima da planta demarcada.

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de análises de solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), para processamento.

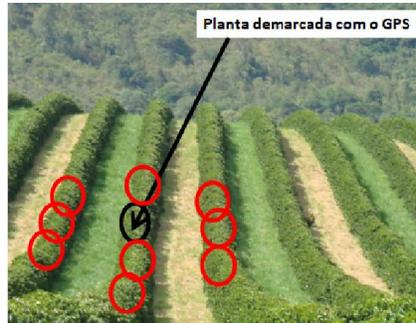
2.4.2 Nutrição Foliar

As amostras de nutrição foliar foram coletadas em três épocas: junho de 2012; dezembro de 2012; e junho de 2013. Destas, foram determinados teores dos macronutrientes N (%), P (%), K (%), Ca (%), Mg (%) e S (%).

A coleta das amostras foliares foi realizada de acordo com Carvalho et al. (2010). Foram utilizadas dez plantas para fornecer folhas, a fim de constituir uma amostra, dispostas de acordo com a Figura 3. Para cada planta, nos quatro pontos cardeais da planta, foram coletados o terceiro ou o quarto par de folhas no terço médio, livres de lesões ocasionadas por doenças, pragas, fenômenos climáticos e tratos culturais. Dessa forma, cada amostra foi constituída de 80 folhas. A retirada das amostras foi feita respeitando-se o intervalo de 30 dias após aplicação de defensivos agrícolas e de qualquer tipo de adubação (via solo ou folha).

Posteriormente, todas as amostras coletadas foram encaminhadas para processamento, no Laboratório da Fundação Procafé, em Varginha- MG.

Figura 3 - Disposição das plantas para coleta de folhas para análise foliar.



2.4.3 Produtividade do cafeeiro

A produtividade do cafeeiro foi avaliada em dois anos, 2012 e 2013.

Por meio de derriça manual no pano, e posterior abanação, foi feita a determinação da produtividade do cafeeiro (L/planta). Para tanto foi necessário o uso de um recipiente graduado em mililitros (mL). A produtividade foi determinada por meio de média de observações de quatro plantas, sendo estas constituídas das mesmas plantas utilizadas para a coleta de solo.

2.5 Análise e processamento dos dados

2.5.1 Identificação da dependência espacial

A análise geoestatística foi feita pela identificação da variabilidade espacial, por meio de ajustes de semivariogramas, pelo estimador clássico (VIEIRA, 2000), como segue:

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

Sendo $N(h)$ o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O semivariograma é representado pelo Gráfico $\hat{\gamma}(h)$

versus h . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominados efeito pepita, C_0 ; patamar, C_0+C_1 ; e o alcance, a . Foi analisado, também, o grau de dependência espacial (GD) das variáveis, seguindo classificação proposta por Cambardella et al. (1994).

A fim de avaliar os ajustes nos semivariogramas, foi realizada a validação (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), o que permitiu obter valores como o erro absoluto (EA) e o desvio padrão do erro absoluto (DP_{EA}), fundamentais para a avaliação de malhas amostrais, conforme será descrito no item 2.5.2.

Quando identificada a variabilidade espacial após o ajuste dos semivariogramas, foi feita a interpolação dos dados por krigagem ordinária. Dessa maneira, foi possível criar mapas temáticos para cada variável, nas épocas avaliadas. Foram gerados também mapas de erro-padrão da predição, a fim de verificar a confiança dos valores interpolados.

Para a análise geoestatística e a criação dos mapas, foi utilizado o software de distribuição livre R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014) por meio do pacote geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001).

2.5.2 Avaliação das malhas amostrais

Para a avaliação das quatro malhas amostrais, foi utilizada metodologia proposta por Ferraz (2012). O autor propõe que os ajustes dos semivariogramas sejam feitos por meio do método dos mínimos quadrados ordinários, utilizando-se o modelo esférico. A avaliação das malhas de amostragem foi feita com base em índices propostos pelo autor, sendo estes o índice de exatidão (IE) e o índice de precisão (IP). Os valores de IE e IP variam de zero a um, sendo que quanto mais próximos de um, mais precisa será a malha amostral. Para determinação do IE e IP são utilizadas as equações 2 e 3, respectivamente.

$$IE = 1 - \frac{|EA|}{|mEA|} \quad (2)$$

Em que: EA é o valor do erro absoluto em módulo da malha que se deseja comparar; e mEA é o módulo do maior valor do erro absoluto de todas as malhas avaliadas.

$$IP = 1 - \frac{DP_{(EA)}}{mDP_{(EA)}} \quad (3)$$

Em que: $DP_{(EA)}$ é o valor do desvio padrão do erro absoluto da malha que se deseja avaliar; e $mDP_{(EA)}$ é o maior valor do desvio padrão do erro absoluto entre todas as malhas que serão avaliadas.

Para a escolha da malha mais adequada para uma variável, Ferraz (2012) sugere a utilização do indicador de malha ótima (IMO), que leva em consideração a ponderação entre o IE e o IP. O IMO varia de zero a um, sendo que quanto mais próximo de um, melhor será a malha amostral (mais exata e mais precisa). Para a determinação do IMO, utiliza-se a equação 4.

$$IMO = (0,5xIE) + (0,5xIP) \quad (4)$$

Para todas as malhas amostrais, e todas as variáveis, foram determinados IE, IP e IMO. As malhas foram avaliadas para cada tipo de amostra (fertilidade do solo, nutrição foliar e produtividade do cafeeiro) para cada época de coleta e, por fim, para uma média de todos os dados. Para comparação dos resultados de IMO entre as malhas, foi utilizado o teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Posteriormente, de acordo com o ranqueamento das malhas amostrais para a média de todos os dados, os mapas de distribuição espacial e de erro-padrão da predição de cada variável foram colocados lado a lado para comparação visual.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise geoestatística e determinação dos índices de exatidão, índice de precisão e indicador de malha ótima

Após a análise geoestatística, foram determinados os índices de exatidão, precisão e o indicador de malha ótimo para cada variável: análise da fertilidade do solo em junho de 2012 (Tabelas 2 a 6), dezembro de 2012 (Tabelas 7 a 11) e junho de 2013 (Tabelas 12 a 16); análise foliar em junho de 2012 (Tabelas 17 e 18), em dezembro de 2012 (Tabelas 19 e 20) e junho de 2013 (Tabelas 20 e 21); e produtividade do cafeeiro (Tabela 23). De modo geral, as variáveis têm grau de dependência espacial de moderado a forte.

Observando os resultados, verifica-se que a classificação das malhas em função dos valores de IE, IP e IMO é diferente para um conjunto de variáveis, levando em consideração uma mesma época. O mesmo é válido para uma única variável, para as épocas de coleta. Isto sugere que cada variável tem um comportamento espacial e temporal, resultando em diferentes graus de dependência espacial e valores de alcance. Como resultado, quando realizada a validação, as malhas amostrais tendem a apresentar valores de erro absoluto (EA) e desvio padrão do erro absoluto (DP_{EA}) não uniformes para as diferentes variáveis e épocas.

Tabela 2 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
pH	A	50%	0,0000	0,1039	0,1039	88,8	For	0,000306	0,274228	0,9380	0,2621	0,6000	1°
	B	50%	0,0978	0,0212	0,1190	140,0	Fra	0,000110	0,329307	0,9777	0,1139	0,5458	2°
	C	70%	0,0830	0,0254	0,1084	190,0	Fra	-0,000481	0,371617	0,9027	0,0000	0,4514	3°
	D	50%	0,0177	0,0762	0,0939	200,0	For	-0,004939	0,317390	0,0000	0,1459	0,0730	4°
K	A	55%	587,7671	1595,0733	2182,8404	281,1	Mod	0,250100	33,780862	0,6599	0,0888	0,3743	1°
	B	55%	493,5495	2036,0909	2529,6404	287,0	For	-0,268200	35,222603	0,6353	0,0499	0,3426	2°
	C	55%	0,0000	2844,5064	2844,5064	253,0	For	-0,446000	37,073290	0,3934	0,0000	0,1967	3°
	D	65%	0,0000	3344,1649	3344,1649	283,9	For	-0,735300	34,003945	0,0000	0,0828	0,0414	4°
P	A	60%	3,7402	35,4549	39,1951	65,8	For	-0,000468	6,376948	0,9961	0,4666	0,7314	1°
	B	50%	27,6177	20,0400	47,6577	54,7	Mod	0,000000	7,296514	1,0000	0,3897	0,6948	2°
	C	50%	39,4866	31,8600	71,3466	101,6	Mod	0,001764	9,704586	0,9854	0,1883	0,5868	3°
	D	50%	0,0000	103,4904	103,4904	184,1	For	0,121200	11,955156	0,0000	0,0000	0,0000	4°

K (mg/dm³); P (mg/dm³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 3 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
Ca	A	55%	0,0338	0,3634	0,3972	102,1	For	0,001907	0,582456	0,8636	0,1242	0,4939	2°
	B	50%	0,2148	0,2307	0,4455	142,4	Mod	-0,001106	0,586989	0,9209	0,1174	0,5191	1°
	C	50%	0,0000	0,5756	0,5756	122,1	For	-0,001645	0,665056	0,8823	0,0000	0,4412	3°
	D	50%	0,0000	0,6011	0,6011	186,1	For	-0,013980	0,660486	0,0000	0,0069	0,0034	4°
Mg	A	50%	0,0245	0,0108	0,0353	160,0	Mod	0,000048	0,174984	0,9593	0,2082	0,5838	1°
	B	50%	0,0298	0,0099	0,0397	160,0	Fra	-0,000225	0,185028	0,8089	0,1628	0,4858	2°
	C	50%	0,0212	0,0357	0,0569	160,0	Mod	-0,000165	0,211017	0,8597	0,0452	0,4524	3°
	D	50%	0,0190	0,0371	0,0561	168,2	Mod	-0,001175	0,220997	0,0000	0,0000	0,0000	4°
Al	A	50%	0,1194	0,0500	0,1694	152,7	Mod	-0,001588	0,387374	0,4389	0,1201	0,2795	3°
	B	50%	0,0000	0,1812	0,1812	81,3	For	0,000185	0,391638	0,9346	0,1104	0,5225	1°
	C	70%	0,0000	0,1694	0,1694	94,3	For	-0,000308	0,440232	0,8911	0,0000	0,4455	2°
	D	50%	0,1295	0,0416	0,1711	240,0	Fra	0,002830	0,407670	0,0000	0,0740	0,0370	4°

Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
H+Al	A	50%	0,0000	2,6157	2,6157	93,6	For	-0,010650	1,378297	0,0000	0,2061	0,1031	4°
	B	50%	0,0000	2,8442	2,8442	85,0	For	-0,004538	1,499327	0,5739	0,1364	0,3551	3°
	C	50%	0,0000	2,8142	2,8142	101,3	For	-0,000808	1,604975	0,9241	0,0755	0,4998	1°
	D	50%	1,6180	1,2072	2,8252	155,8	Mod	0,000835	1,736131	0,9216	0,0000	0,4608	2°
SB	A	50%	0,0000	0,7772	0,7772	94,3	For	0,001128	0,802859	0,9394	0,1402	0,5398	1°
	B	50%	0,6254	0,2762	0,9016	250,0	Mod	-0,001212	0,842220	0,9349	0,0981	0,5165	2°
	C	50%	0,1356	1,0244	1,1600	142,5	For	-0,002986	0,923246	0,8396	0,0113	0,4255	3°
	D	50%	0,0000	1,1912	1,1912	186,8	For	-0,018620	0,933793	0,0000	0,0000	0,0000	4°
t	A	50%	0,1754	0,1996	0,3750	240,0	Mod	-0,000151	0,514289	0,9887	0,2401	0,6144	1°
	B	50%	0,1334	0,2597	0,3931	190,0	Mod	-0,002441	0,503122	0,8166	0,2566	0,5366	2°
	C	50%	0,0000	0,5659	0,5659	161,2	For	-0,005538	0,609166	0,5839	0,1000	0,3419	3°
	D	50%	0,0000	0,5815	0,5815	187,5	For	-0,013310	0,676814	0,0000	0,0000	0,0000	4°

H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 5 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para dados o T, V e m, determinados pela análise de solo, referentes à coleta em junho 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
T	A	50%	0,3753	1,0235	1,3988	163,9	Mod	-0,014660	0,904783	0,8027	0,3845	0,5936	2°
	B	50%	0,0000	1,4694	1,4694	104,9	For	-0,017630	0,925835	0,7627	0,3702	0,5664	3°
	C	50%	0,0000	1,6355	1,6355	162,5	For	0,003150	1,022265	0,9576	0,3046	0,6311	1°
	D	65%	0,0000	2,3018	2,3018	338,3	For	-0,074290	1,469959	0,0000	0,0000	0,0000	4°
V(%)	A	55%	116,5259	34,4393	150,9652	276,7	Fra	0,036410	11,397888	0,7907	0,0567	0,4237	3°
	B	50%	0,0000	157,1693	157,1693	93,8	For	-0,006620	10,901171	0,9620	0,0978	0,5299	1°
	C	50%	0,0000	182,6355	182,6355	121,4	For	0,000532	12,082730	0,9969	0,0000	0,4985	2°
	D	50%	0,0000	183,1576	183,1576	181,5	For	-0,174000	11,759669	0,0000	0,0267	0,0134	4°
m(%)	A	50%	0,0000	432,4223	432,4223	88,8	For	-0,077080	18,420334	0,7983	0,1300	0,4642	3°
	B	50%	291,9254	198,4054	490,3308	152,1	Mod	0,011310	20,008888	0,9704	0,0550	0,5127	1°
	C	50%	240,3428	250,6806	491,0234	120,4	Mod	-0,013380	21,173293	0,9650	0,0000	0,4825	2°
	D	50%	0,0000	443,3459	443,3459	202,4	For	0,382200	18,681529	0,0000	0,1177	0,0588	4°

T (cmol_c.dm⁻³); V(%); m(%); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP -Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 6 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em de junho 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

69

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
M.O.	A	50%	0,0420	0,1162	0,1582	280,0	Mod	-0,000498	0,281481	0,9381	0,4445	0,6913	1°
	B	50%	0,0514	0,1239	0,1753	250,0	Mod	-0,003482	0,319165	0,5670	0,3701	0,4685	3°
	C	50%	0,0353	0,2151	0,2504	250,0	For	0,008041	0,400662	0,0000	0,2093	0,1046	4°
	D	70%	0,0187	0,3853	0,4040	298,7	For	0,000476	0,506715	0,9408	0,0000	0,4704	2°
P-rem	A	50%	0,0000	10,1254	10,1254	112,0	For	0,022570	2,433786	0,6800	0,2842	0,4821	1°
	B	50%	0,0000	10,7993	10,7993	107,7	For	-0,030340	2,410671	0,5698	0,2910	0,4304	2°
	C	50%	2,7062	8,8988	11,6050	148,3	For	-0,070530	3,104302	0,0000	0,0870	0,0435	4°
	D	50%	0,0000	17,1340	17,1340	189,5	For	-0,056730	3,400229	0,1957	0,0000	0,0978	3°

M.O. (dag/Kg); P-rem (mg/L); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 100 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP -Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 7 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C0	C1	C0+C1	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
pH	A	50%	0,0288	0,2091	0,2379	200,0	For	0,003832	0,376880	0,3410	0,2333	0,2871	2°
	B	55%	0,0004	0,2583	0,2587	240,0	For	-0,005815	0,347704	0,0000	0,2926	0,1463	4°
	C	50%	0,0858	0,1531	0,2389	225,8	Mod	0,003093	0,448188	0,4681	0,0882	0,2782	3°
	D	50%	0,0845	0,1162	0,2007	250,0	Mod	0,000892	0,491547	0,8467	0,0000	0,4233	1°
K	A	60%	408,5205	805,2720	1213,7925	319,0	For	0,217100	27,195498	0,6265	0,2313	0,4289	3°
	B	60%	311,1920	992,2299	1303,4219	310,4	For	-0,033370	25,924195	0,9426	0,2672	0,6049	1°
	C	65%	1070,0343	166,4033	1236,4376	229,4	Fra	-0,005189	35,377967	0,9911	0,0000	0,4955	2°
	D	60%	0,0000	1626,7730	1626,7730	253,1	For	-0,581200	30,176677	0,0000	0,1470	0,0735	4°
P	A	65%	0,0000	19,5202	19,5202	92,5	For	-0,000106	4,791187	0,9927	0,2659	0,6293	1°
	B	50%	19,8215	1,7128	21,5343	172,2	Fra	0,001424	5,028600	0,9012	0,2295	0,5654	2°
	C	50%	28,5942	7,4775	36,0717	215,8	Fra	0,009021	6,526704	0,3744	0,0000	0,1872	4°
	D	43,9%	0,0000	3,7774	3,7774	185,1	For	-0,014420	2,334168	0,0000	0,6424	0,3212	3°

K (mg/dm³); P (mg/dm³); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 8 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

92

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
Ca	A	65%	0,0610	0,9825	1,0435	299,7	For	0,002959	0,730797	0,8065	0,2956	0,5510	1°
	B	60%	0,2676	0,7492	1,0168	298,4	Mod	-0,008506	0,738821	0,4437	0,2879	0,3658	3°
	C	50%	0,5996	0,4624	1,0620	213,3	Mod	-0,005329	0,951288	0,6515	0,0831	0,3673	2°
	D	50%	0,0000	1,0951	1,0951	183,6	For	-0,015290	1,037506	0,0000	0,0000	0,0000	4°
Mg	A	50%	0,0083	0,0795	0,0878	210,0	For	0,000998	0,230592	0,7457	0,2340	0,4898	2°
	B	50%	0,0039	0,0923	0,0962	200,0	For	-0,000688	0,245321	0,8248	0,1851	0,5050	1°
	C	50%	0,0334	0,0706	0,1040	214,7	Mod	0,003925	0,281770	0,0000	0,0640	0,0320	4°
	D	60%	0,0000	0,0866	0,0866	159,9	For	-0,000122	0,301032	0,9689	0,0000	0,4844	3°
Al	A	50%	0,0567	0,0732	0,1299	200,0	Mod	-0,001140	0,327928	0,0218	0,3229	0,1723	2°
	B	50%	0,0672	0,0695	0,1367	230,0	Mod	-0,001140	0,327928	0,0000	0,2831	0,1416	4°
	C	70%	0,0000	0,1727	0,1727	100,3	For	-0,001140	0,327928	0,3199	0,0000	0,1600	3°
	D	60%	0,0444	0,0485	0,0929	140,0	Mod	-0,001140	0,327928	0,8543	0,2725	0,5634	1°

Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 9 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
H+Al	A	50%	1,4534	2,9952	4,4486	214,2	Mod	-0,017490	1,632459	0,0000	0,2795	0,1397	4°
	B	50%	1,7506	2,4657	4,2163	167,7	Mod	0,007096	1,732372	0,5943	0,2354	0,4148	3°
	C	55%	4,4231	0,9396	5,3627	144,8	Fra	-0,001318	2,265722	0,9246	0,0000	0,4623	2°
	D	60%	0,0000	2,6657	2,6657	141,8	For	0,002912	1,790868	0,8335	0,2096	0,5215	1°
SB	A	55%	0,5245	1,1804	1,7049	296,9	Mod	0,010400	1,027368	0,5281	0,2561	0,3921	3°
	B	60%	0,4895	1,5240	2,0135	329,3	For	-0,010130	1,013317	0,5404	0,2663	0,4034	2°
	C	50%	1,0520	0,9151	1,9671	216,7	Mod	-0,005425	1,292078	0,7539	0,0645	0,4092	1°
	D	50%	0,0000	1,9217	1,9217	194,2	For	-0,022040	1,381149	0,0000	0,0000	0,0000	4°
t	A	60%	0,3178	0,7405	1,0583	321,2	Mod	0,008622	0,785895	0,5960	0,2383	0,4171	3°
	B	65%	0,0224	1,1957	1,2181	295,5	For	-0,008312	0,751468	0,6105	0,2716	0,4411	2°
	C	50%	0,3380	0,8442	1,1822	218,4	Mod	-0,004047	0,927643	0,8104	0,1009	0,4556	1°
	D	50%	0,0000	1,3219	1,3219	199,2	For	-0,021340	1,031723	0,0000	0,0000	0,0000	4°

H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 10 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o T, V e m, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

82

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
T	A	50%	0,3052	1,3159	1,6211	190,8	For	-0,009514	0,907446	0,0000	0,3036	0,1518	4°
	B	50%	0,0000	1,5156	1,5156	112,0	For	-0,005685	0,974589	0,4025	0,2520	0,3272	3°
	C	50%	1,2444	0,5003	1,7447	119,5	Mod	-0,002143	1,302990	0,7748	0,0000	0,3874	2°
	D	60%	0,0000	0,7770	0,7770	154,1	For	-0,003772	0,939541	0,6035	0,2789	0,4412	1°
V(%)	A	55%	91,3611	163,2011	254,5622	270,6	Mod	0,136500	13,039449	0,0000	0,1740	0,0870	3°
	B	60%	90,7905	178,2398	269,0303	299,0	Mod	-0,101400	12,428761	0,2571	0,2127	0,2349	2°
	C	50%	178,2106	93,2216	271,4322	209,9	Mod	-0,027580	15,787091	0,7979	0,0000	0,3990	1°
	D	60%	0,0000	216,5925	216,5925	172,2	For	-0,124200	15,155699	0,0901	0,0400	0,0651	4°
m(%)	A	50%	148,8099	129,2634	278,0733	261,5	Mod	-0,066690	14,748676	0,2129	0,2370	0,2250	3°
	B	55%	158,7745	124,9168	283,6913	291,2	Mod	0,084730	15,125276	0,0000	0,2175	0,1088	4°
	C	60%	0,4814	377,0472	377,5286	65,0	For	0,002254	19,330507	0,9734	0,0000	0,4867	1°
	D	60%	0,0000	218,7682	218,7682	138,2	For	0,028330	16,557853	0,6656	0,1434	0,4045	2°

T (cmol.c.dm⁻³); V(%); m(%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP -Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 11 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
M.O.	A	50%	0,0682	0,0421	0,1103	210,0	Mod	-0,000975	0,279606	0,4462	0,1061	0,2761	2°
	B	50%	0,0000	0,1220	0,1220	106,6	For	-0,001480	0,312312	0,1596	0,0015	0,0805	4°
	C	50%	0,0760	0,0279	0,1039	170,0	Mod	-0,000685	0,312782	0,6112	0,0000	0,3056	1°
	D	50%	0,0000	0,0325	0,0325	187,6	Mod	-0,001761	0,159079	0,0000	0,4914	0,2457	3°
P-rem	A	50%	5,6009	10,7937	16,3946	170,7	Mod	0,000099	3,333079	0,9983	0,2180	0,6081	1°
	B	50%	9,2996	7,5483	16,8479	144,8	Mod	-0,002421	3,729182	0,9594	0,1250	0,5422	2°
	C	50%	0,8592	18,8605	19,7197	119,2	For	-0,059700	4,262035	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	D	50%	0,0000	11,8534	11,8534	166,3	For	-0,028900	3,230910	0,5159	0,2419	0,3789	3°

M.O. (dag/Kg); P-rem (mg/L); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 12 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o pH, K e P, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
pH	A	50%	0,1916	0,0127	0,2043	140,0	Fra	0,000158	0,463653	0,7085	0,1131	0,4108	1°
	B	50%	0,1709	0,0198	0,1907	150,0	Fra	-0,000255	0,452805	0,5280	0,1338	0,3309	3°
	C	50%	0,1936	0,0339	0,2275	145,9	Fra	-0,000541	0,470033	0,0000	0,1009	0,0504	4°
	D	60%	0,1731	0,0816	0,2547	130,0	Mod	-0,000159	0,522777	0,7061	0,0000	0,3531	2°
K	A	55%	509,7777	74,0320	583,8097	211,2	Fra	0,002070	23,896903	0,9556	0,0408	0,4982	1°
	B	50%	0,0000	585,6486	585,6486	79,4	For	-0,046650	22,362991	0,0000	0,1024	0,0512	4°
	C	44%	575,0590	78,3784	653,4374	217,6	Fra	-0,009847	24,913082	0,7889	0,0000	0,3945	3°
	D	65%	384,3913	91,9549	476,3462	123,4	Fra	-0,002192	24,691175	0,9530	0,0089	0,4810	2°
P	A	50%	40,4414	20,5453	60,9867	75,5	Mod	-0,001633	8,054680	0,9941	0,3598	0,6769	1°
	B	65%	26,3770	53,1470	79,5240	373,6	Mod	0,022480	8,492098	0,9186	0,3250	0,6218	2°
	C	50%	40,8548	35,1726	76,0274	139,5	Mod	0,055170	9,741404	0,8003	0,2257	0,5130	3°
	D	50%	47,0822	84,6552	131,7374	252,2	Mod	0,276300	12,580840	0,0000	0,0000	0,0000	4°

K (mg/dm³); P (mg/dm³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 13 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o Ca, Mg e Al, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
Ca	A	50%	0,6051	0,1764	0,7815	160,0	Fra	0,002691	0,885815	0,0000	0,1786	0,0893	4°
	B	50%	0,5387	0,1220	0,6607	130,0	Fra	-0,000699	0,826275	0,7402	0,2338	0,4870	2°
	C	50%	0,3847	0,4109	0,7956	120,4	Mod	-0,001950	0,871689	0,2754	0,1917	0,2335	3°
	D	50%	0,8753	0,2626	1,1379	120,0	Fra	-0,000031	1,078415	0,9886	0,0000	0,4943	1°
Mg	A	50%	0,0385	0,0227	0,0612	120,0	Mod	0,000541	0,238189	0,5907	0,2934	0,4421	3°
	B	50%	0,0486	0,0080	0,0566	150,0	Fra	-0,000128	0,240305	0,9033	0,2871	0,5952	1°
	C	50%	0,0410	0,0363	0,0773	190,0	Mod	-0,001321	0,254018	0,0000	0,2465	0,1232	4°
	D	50%	0,0762	0,0381	0,1143	120,0	Mod	-0,000014	0,337101	0,9893	0,0000	0,4946	2°
Al	A	50%	0,2182	0,0125	0,2307	180,0	Fra	-0,000324	0,477604	0,3393	0,1125	0,2259	3°
	B	50%	0,0000	0,2283	0,2283	80,5	For	0,000333	0,453962	0,3203	0,1564	0,2383	2°
	C	50%	0,1859	0,0590	0,2449	150,0	Fra	0,000490	0,501713	0,0000	0,0677	0,0338	4°
	D	50%	0,1509	0,0755	0,2264	115,0	Mod	0,000000	0,538143	0,9998	0,0000	0,4999	1°

Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 14 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o H+Al, SB e t, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Ran k
H+Al	A	50%	0,0000	5,1201	5,1201	81,4	For	-0,006682	2,092755	0,0000	0,1321	0,0661	4°
	B	50%	0,0000	4,6583	4,6583	78,9	For	0,000115	2,087745	0,9828	0,1342	0,5585	1°
	C	50%	3,4882	1,4434	4,9316	116,0	Mod	0,000630	2,243865	0,9057	0,0695	0,4876	3°
	D	50%	3,9915	0,9915	4,9830	120,0	Fra	0,000013	2,411401	0,9981	0,0000	0,4990	2°
SB	A	50%	0,0000	1,3264	1,3264	80,5	For	0,001967	1,099525	0,3231	0,2460	0,2845	3°
	B	50%	0,0000	1,1681	1,1681	78,3	For	-0,001367	1,071200	0,5296	0,2654	0,3975	2°
	C	50%	0,6348	0,8266	1,4614	120,4	Mod	-0,002906	1,181754	0,0000	0,1896	0,0948	4°
	D	50%	0,2946	1,7948	2,0894	120,0	For	-0,000163	1,458186	0,9439	0,0000	0,4720	1°
t	A	50%	0,3996	0,2048	0,6044	226,5	Mod	0,004095	0,752090	0,6588	0,2596	0,4592	2°
	B	50%	0,3836	0,1068	0,4904	130,0	Fra	-0,000799	0,703422	0,9334	0,3075	0,6205	1°
	C	50%	0,2248	0,4545	0,6793	150,5	Mod	-0,003727	0,791745	0,6894	0,2206	0,4550	3°
	D	50%	0,0000	1,1365	1,1365	167,2	For	-0,012000	1,015832	0,0000	0,0000	0,0000	4°

H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 15 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para o T, V e m, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
T	A	50%	0,0000	2,0680	2,0680	94,6	For	-0,012740	1,286608	0,0000	0,0665	0,0333	4°
	B	50%	0,0000	2,0117	2,0117	85,9	For	-0,002242	1,344655	0,8240	0,0244	0,4242	3°
	C	55%	1,0462	0,6217	1,6679	105,7	Mod	-0,000347	1,357563	0,9728	0,0150	0,4939	1°
	D	65%	0,0000	1,7063	1,7063	133,8	For	-0,001029	1,378297	0,9192	0,0000	0,4596	2°
V(%)	A	50%	0,0000	269,8201	269,8201	80,1	For	0,031310	15,736563	0,0000	0,2091	0,1046	4°
	B	50%	0,0000	228,8535	228,8535	77,4	For	-0,010550	15,113743	0,6630	0,2404	0,4517	2°
	C	50%	152,4462	121,7941	274,2403	118,3	Mod	-0,025730	16,193235	0,1782	0,1861	0,1822	3°
	D	50%	313,3772	65,1830	378,5602	119,5	Fra	-0,000279	19,897058	0,9911	0,0000	0,4955	1°
m(%)	A	50%	0,0000	590,8512	590,8512	81,0	Mod	-0,057440	22,352287	0,0000	0,1765	0,0883	4°
	B	50%	0,0000	568,3494	568,3494	82,7	Mod	0,031770	22,431482	0,4469	0,1736	0,3102	3°
	C	50%	490,5107	107,8113	598,3220	120,4	Fra	0,014100	25,118975	0,7545	0,0746	0,4146	2°
	D	65%	0,0000	590,4155	590,4155	122,5	For	0,004123	27,143325	0,9282	0,0000	0,4641	1°

T (cmol_c.dm⁻³); V(%); m(%); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP -Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 16 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a M.O. e P-rem, determinados pela análise de solo, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
M.O.	A	50%	0,2974	0,0916	0,3890	210,0	Fra	-0,001514	0,567377	0,0000	0,0874	0,0437	3°
	B	50%	0,3098	0,0441	0,3539	120,0	Fra	-0,000246	0,554004	0,8373	0,1089	0,4731	2°
	C	55%	0,3055	0,1318	0,4373	120,0	Mod	-0,001446	0,621727	0,0449	0,0000	0,0225	4°
	D	50%	0,0000	0,1674	0,1674	120,0	For	0,000030	0,450897	0,9804	0,2748	0,6276	1°
P-rem	A	50%	4,6674	5,7499	10,4173	100,0	Mod	0,000707	3,198548	0,8894	0,0000	0,4447	1°
	B	50%	6,8306	2,3348	9,1654	99,2	Mod	0,001593	2,996865	0,7510	0,0631	0,4070	2°
	C	70%	0,0000	8,9722	8,9722	78,5	For	0,001687	3,189176	0,7363	0,0029	0,3696	3°
	D	45%	0,0000	2,1601	2,1601	173,7	For	-0,006398	1,573295	0,0000	0,5081	0,2541	4°

M.O. (dag/Kg); P-rem (mg/L); D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 17 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do N, P e K determinados pela análise foliar, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
N	A	50%	0,0000	0,0263	0,0263	144,7	For	-0,000483	0,139029	0,0000	0,1602	0,0801	3°
	B	50%	0,0035	0,0201	0,0236	105,4	For	-0,000182	0,148511	0,6241	0,1030	0,3635	1°
	C	50%	0,0140	0,0140	0,0280	120,0	Mod	-0,000180	0,165557	0,6282	0,0000	0,3141	2°
	D	50%	0,0000	0,0228	0,0228	150,0	For	-0,000433	0,164131	0,1037	0,0086	0,0562	4°
P	A	50%	0,0001	0,0003	0,0004	100,0	Mod	0,000054	0,014844	0,0192	0,2401	0,1296	3°
	B	50%	0,0001	0,0003	0,0004	200,0	For	0,000013	0,014994	0,7657	0,2324	0,4990	1°
	C	50%	0,0002	0,0002	0,0004	200,0	Mod	0,000055	0,018148	0,0000	0,0709	0,0354	4°
	D	50%	0,0002	0,0001	0,0003	200,0	Mod	-0,000017	0,019533	0,6920	0,0000	0,3460	2°
K	A	50%	0,0562	0,1041	0,1603	180,0	Mod	0,003032	0,381661	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	B	50%	0,0409	0,1228	0,1637	210,0	For	0,001774	0,352540	0,4149	0,0763	0,2456	2°
	C	50%	0,0307	0,0770	0,1077	200,0	Mod	-0,002928	0,307034	0,0343	0,1955	0,1149	3°
	D	50%	0,0156	0,0570	0,0726	200,0	For	-0,002198	0,293259	0,2751	0,2316	0,2533	1°

N (%); P (%); K (%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 18 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em junho de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
Ca	A	50%	0,0000	0,2545	0,2545	184,8	For	-0,003663	0,260248	0,5509	0,3982	0,4746	2°
	B	50%	0,0000	0,2509	0,2509	157,0	For	-0,003350	0,290329	0,5893	0,3286	0,4590	3°
	C	50%	0,0768	0,2189	0,2957	160,0	Mod	-0,008157	0,432429	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	D	50%	0,1189	0,0445	0,1634	160,0	Mod	-0,000037	0,425628	0,9955	0,0157	0,5056	1°
Mg	A	50%	0,0000	0,0058	0,0058	240,0	For	-0,000534	0,044870	0,3441	0,3101	0,3271	2°
	B	50%	0,0000	0,0061	0,0061	179,9	For	-0,000716	0,051477	0,1206	0,2086	0,1646	3°
	C	50%	0,0000	0,0045	0,0045	132,2	For	-0,000814	0,065042	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	D	50%	0,0000	0,0035	0,0035	140,5	For	-0,000116	0,063895	0,8578	0,0176	0,4377	1°
S	A	50%	0,0003	0,0001	0,0004	230,0	Mod	-0,000080	0,018422	0,0000	0,2410	0,1205	4°
	B	50%	0,0003	0,0001	0,0004	230,0	Mod	-0,000014	0,019329	0,8265	0,2036	0,5150	1°
	C	50%	0,0003	0,0002	0,0005	210,0	Mod	-0,000031	0,022859	0,6176	0,0581	0,3378	2°
	D	50%	0,0004	0,0002	0,0006	210,0	Mod	0,000054	0,024270	0,3239	0,0000	0,1619	3°

Ca (%); Mg (%); S (%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 19 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do N, P e K determinados pela análise foliar, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
N	A	50%	0,0298	0,0028	0,0326	160,0	Fra	0,000161	0,172659	0,9809	0,1784	0,5797	2°
	B	50%	0,0223	0,0090	0,0313	100,0	Mod	0,000056	0,173853	0,9934	0,1727	0,5831	1°
	C	60%	0,0000	0,0363	0,0363	63,5	For	-0,000005	0,208843	0,9994	0,0062	0,5028	3°
	D	65%	0,0000	0,0262	0,0262	295,0	For	0,008451	0,210149	0,0000	0,0000	0,0000	4°
P	A	50%	0,0001	0,0001	0,0002	180,0	Mod	0,000011	0,013013	0,8998	0,2596	0,5797	1°
	B	50%	0,0001	0,0002	0,0003	200,0	Mod	-0,000113	0,014206	0,0000	0,1917	0,0959	4°
	C	50%	0,0002	0,0002	0,0004	200,0	Mod	-0,000018	0,015740	0,8403	0,1044	0,4723	2°
	D	50%	0,0001	0,0001	0,0002	200,0	Mod	0,000011	0,017575	0,9005	0,0000	0,4503	3°
K	A	50%	0,0375	0,0239	0,0614	270,0	Mod	-0,000503	0,215760	0,9120	0,0211	0,4666	3°
	B	50%	0,0297	0,0290	0,0587	150,7	Mod	0,000090	0,212378	0,9842	0,0365	0,5103	1°
	C	50%	0,0164	0,0159	0,0323	220,0	Mod	-0,001460	0,178550	0,7445	0,1900	0,4672	2°
	D	50%	0,0000	0,0533	0,0533	268,4	For	0,005715	0,220421	0,0000	0,0000	0,0000	4°

N (%); P (%); K (%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP -Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 20 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em dezembro de 2012, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
Ca	A	55%	0,0068	0,0154	0,0222	180,0	Mod	0,002261	0,125737	0,0000	0,0805	0,0403	4°
	B	50%	0,0000	0,0196	0,0196	112,7	For	-0,000335	0,121513	0,8519	0,1114	0,4816	2°
	C	50%	0,0081	0,0099	0,0180	200,0	Mod	0,001128	0,119391	0,5011	0,1269	0,3140	3°
	D	50%	0,0000	0,0165	0,0165	130,0	For	-0,000078	0,136748	0,9654	0,0000	0,4827	1°
Mg	A	50%	0,0009	0,0005	0,0014	200,0	Mod	0,000047	0,035834	0,9050	0,2947	0,5998	1°
	B	50%	0,0008	0,0008	0,0016	220,0	Mod	-0,000402	0,035819	0,1916	0,2950	0,2433	3°
	C	50%	0,0004	0,0017	0,0021	220,0	For	-0,000497	0,039686	0,0000	0,2188	0,1094	4°
	D	50%	0,0015	0,0007	0,0022	200,0	Mod	-0,000038	0,050804	0,9231	0,0000	0,4616	2°
S	A	50%	0,0000	0,0002	0,0002	160,0	For	-0,000117	0,014782	0,2453	0,2184	0,2319	2°
	B	50%	0,0000	0,0002	0,0002	150,0	For	0,000155	0,014571	0,0000	0,2295	0,1148	3°
	C	50%	0,0000	0,0002	0,0002	160,0	For	-0,000126	0,018913	0,1845	0,0000	0,0922	4°
	D	50%	0,0000	0,0002	0,0002	160,0	For	0,000112	0,014781	0,2770	0,2185	0,2478	1°

Ca (%); Mg (%); S (%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 21 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do N, P e K, determinados pela análise foliar, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral

Var.	Malha	Dmáx	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
N	A	50%	0,0000	0,0187	0,0187	77,2	For	-0,000226	0,137135	0,2661	0,0080	0,1371	3°
	B	55%	0,0146	0,0041	0,0187	176,4	Fra	-0,000308	0,138245	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	C	60%	0,0098	0,0048	0,0146	80,0	Mod	-0,000008	0,129010	0,9576	0,0668	0,5212	1°
	D	50%	0,0000	0,0143	0,0143	118,6	For	-0,000002	0,138186	0,9941	0,0004	0,4973	2°
P	A	50%	0,0002	0,0002	0,0004	240,0	Mod	0,000104	0,016826	0,8060	0,1220	0,4640	1°
	B	50%	0,0001	0,0003	0,0004	240,0	For	-0,000238	0,016106	0,5582	0,1595	0,3589	3°
	C	50%	0,0002	0,0004	0,0006	240,0	Mod	-0,000538	0,019163	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	D	50%	0,0001	0,0002	0,0003	230,0	Mod	-0,000236	0,015261	0,5603	0,2036	0,3820	2°
K	A	50%	0,0260	0,0244	0,0504	126,1	Mod	0,000144	0,222517	0,8775	0,0000	0,4388	3°
	B	50%	0,0372	0,0068	0,0440	120,0	Fra	-0,000111	0,218270	0,9055	0,0191	0,4623	2°
	C	60%	0,0004	0,0306	0,0310	100,0	For	-0,001174	0,198898	0,0000	0,1061	0,0531	4°
	D	50%	0,0000	0,0383	0,0383	120,4	For	0,000022	0,216431	0,9813	0,0274	0,5043	1°

N (%); P (%); K (%); Dmáx - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco

Tabela 22 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, do Ca, Mg e S determinados pela análise foliar, em junho de 2013, e resultados da avaliação da malha amostral.

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
Ca	A	50%	0,0239	0,1638	0,1877	270,0	For	0,002277	0,324479	0,0000	0,0000	0,0000	4°
	B	50%	0,0170	0,1183	0,1353	210,0	For	-0,000128	0,291852	0,9437	0,1006	0,5221	1°
	C	50%	0,0201	0,0733	0,0934	230,0	For	0,001197	0,230761	0,4743	0,2888	0,3816	3°
	D	50%	0,0017	0,1012	0,1029	180,0	For	-0,000411	0,315430	0,8193	0,0279	0,4236	2°
Mg	A	50%	0,0023	0,0025	0,0048	230,0	Mod	0,000241	0,060512	0,7321	0,0079	0,3700	3°
	B	50%	0,0027	0,0008	0,0035	200,0	Fra	-0,000199	0,052377	0,7783	0,1413	0,4598	1°
	C	50%	0,0019	0,0022	0,0041	200,0	Mod	0,000218	0,059523	0,7568	0,0241	0,3905	2°
	D	50%	0,0000	0,0064	0,0064	230,0	For	-0,000898	0,060994	0,0000	0,0000	0,0000	4°
S	A	50%	0,0002	0,0002	0,0004	130,0	Mod	-0,000028	0,019704	0,8661	0,3044	0,5853	1°
	B	50%	0,0000	0,0004	0,0004	170,0	For	-0,000209	0,020552	0,0000	0,2745	0,1372	4°
	C	50%	0,0000	0,0004	0,0004	170,0	For	-0,000134	0,028328	0,3597	0,0000	0,1799	3°
	D	50%	0,0000	0,0005	0,0005	160,0	For	-0,000100	0,026520	0,5185	0,0638	0,2911	2°

Ca (%); Mg (%); S (%); NPG - Número de pontos georreferenciados; D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 23 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e pelo método dos quadrados mínimos ordinários, para a produtividade do cafeeiro, em 2012 e 2013, e resultados da avaliação da malha amostral

Var.	Malha	D _{máx}	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	EA	DP _(EA)	IE	IP	IMO	Rank
Prod. 2012	A	50%	0,0000	40,3776	40,3776	236,1	For	-0,037490	2,338102	0,6490	0,5875	0,6182	2°
	B	50%	0,0000	39,1321	39,1321	210,4	For	-0,029300	2,332924	0,7257	0,5884	0,6570	1°
	C	50%	0,0000	34,7082	34,7082	175,8	For	-0,106800	2,780764	0,0000	0,5094	0,2547	4°
	D	50%	0,0000	31,3672	31,3672	167,4	For	-0,004829	5,667794	0,9548	0,0000	0,4774	3°
Prod. 2013	A	50%	0,3735	33,6367	34,0102	202,2	For	0,009420	3,502585	0,5129	0,2654	0,3892	2°
	B	50%	0,5071	29,4254	29,9325	158,5	For	0,019100	4,565109	0,0124	0,0426	0,0275	4°
	C	50%	11,4141	11,3005	22,7146	157,4	Mod	0,019340	4,504036	0,0000	0,0554	0,0277	3°
	D	60%	0,0000	16,0229	16,0229	139,0	For	0,001250	4,768158	0,9354	0,0000	0,4677	1°

Prod. 2012 - Produtividade do café (L/planta) em 2012; Prod. 2013 - Produtividade do café (L/planta) em 2013; D_{máx} - porcentagem da maior distância entre dois pontos da malha de 64 pontos, para ser utilizada no ajuste do semivariograma; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial; EA - Erro absoluto; DP_(EA) - Desvio padrão do erro absoluto; IE - Índice de exatidão; IP - Índice de precisão; IMO - Índice de malha ótimo; For - Forte; Mod - Moderado; Fra - Fraco.

3.1.1 Uso do indicador de malha ótima no gerenciamento das operações de coleta

Apesar das malhas obtidas pelo IMO para cada variável, na prática, objetiva-se estabelecer uma única malha para um conjunto de variáveis, uma vez que o produtor rural deseja saber as condições de sua lavoura de forma geral, e não apenas para uma variável. Diante disso, é necessário determinar o IMO médio, levando em consideração todos os dados disponíveis.

No caso da fertilidade do solo, observa-se, pelos dados da Tabela 24, que as quatro malhas foram estatisticamente iguais para todos os períodos, exceto para junho de 2012, em que a D (12 pontos - 0,5 pontos/ha) foi significativamente inferior. Para a média dos períodos de coleta, a malha de 12 pontos foi considerada inferior às malhas A (64 pontos - 3,0 pontos/ha) e B (46 pontos - 2,0 pontos/ha). Em relação às malhas, em função do período de coleta, observa-se que para a malha A, o período de junho de 2012 foi significativamente maior em relação ao período de junho de 2013. Para a malha B, o IMO de junho de 2012 foi estatisticamente superior à dezembro de 2012. No caso da malha C, todos os períodos foram iguais. E para a malha D, o IMO de junho de 2012 foi inferior aos de outros períodos. Estas diferenças são justificadas pela própria variabilidade temporal que as variáveis têm, bem como os diferentes ajustes de semivariogramas criados.

Tabela 24 - Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, para a fertilidade do solo, para junho/2012, dezembro/2012, junho/2013, e para a média das três épocas.

Malha	Pontos	Pontos/ha	Jun/12	Dez/12	Jun/13	Média dos períodos
A	64	3,0	49,82 aA	34,68 aAB	27,62 aB	37,38 a
B	46	2,0	50,19 aA	34,87 aB	42,62 aAB	42,56 a
C	23	1,0	40,01 aA	31,61 aA	27,63 aA	33,09 ab
D	12	0,5	08,97 bB	28,02 aA	39,96 aA	25,65 b

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula por coluna e maiúscula por linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Em relação à análise foliar, observa-se, pelos dados da Tabela 25, que, para todas as épocas e para a média das épocas, as malhas foram consideradas estatisticamente idênticas.

Tabela 25 - Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, para a análise foliar, para junho/2012, dezembro/2012, junho/2013, e para a média das três épocas.

Malha	Pontos	Pontos/ha	Jun/12	Dez/12	Jun/13	Média dos períodos
A	64	3,0	18,86 aA	41,63 aA	33,25 aA	31,25 a
B	46	2,0	37,45 aA	33,81 aA	32,34 aA	34,53 a
C	23	1,0	13,37 aA	32,64 aA	25,43 aA	23,81 a
D	12	0,5	29,35 aA	27,37 aA	34,97 aA	30,56 a

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula por coluna e maiúscula por linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na Tabela 26 estão apresentados os resultados do IMO para a produtividade do cafeeiro para os anos de 2012, 2013 e média dos períodos.

Tabela 26 - Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio para a produtividade do cafeeiro em 2012, 2013 e média dos dois anos.

Malha	Pontos	Pontos/ha	2012	2013	Média dos períodos
A	64	3,0	61,82	38,92	50,37
B	46	2,0	65,70	2,75	34,23
C	23	1,0	25,47	2,77	14,12
D	12	0,5	47,74	46,77	47,25

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Por fim, foi feita a determinação do IMO médio (Tabela 27), levando em consideração todas as variáveis (fertilidade do solo, análise foliar e produtividade) e todas as épocas de coleta.

Tabela 27 - Ranqueamento das malhas em função do índice de malha ótimo médio, considerando todas as variáveis (fertilidade do solo, análise foliar e produtividade do cafeeiro) e todas as épocas de coleta.

Malha	Pontos	Pontos/ha	Média dos períodos
A	64	3,0	36,02 ab
B	46	2,0	39,96 a
C	23	1,0	29,78 b
D	12	0,5	27,77 b

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que as malhas A (64 pontos - 3,0 pontos/ha) e B (46 pontos - 2,0 pontos/ha) são iguais estatisticamente. As malhas C (23 pontos - 1,0 ponto/ha) e D (12 pontos - 0,5 ponto/ha) são significativamente inferiores à malha B. Se for considerado o custo de processamento de laboratório para análise de uma amostra de fertilidade do solo igual a R\$17,50 e, para análise nutricional foliar de uma amostra, o custo de R\$26,00, do ponto de vista econômico, a malha recomendada para a cafeicultura de precisão é a B, uma vez

que, ao considerar a quantidade de pontos amostrais, o custo total é de R\$87,00, além do fato de a menor quantidade de pontos da malha resultar em menor tempo para a retirada das amostras e para o seu processamento em laboratório. Em relação às demais malhas, ao considerar os resultados estatísticos e o fator econômico, em segundo lugar ficou a D (12 pontos - 0,5 ponto/ha, custo igual a R\$21,75), seguida pela malha C (23 pontos - 1,0 ponto/ha, custo de processamento de amostras igual a R\$43,50) e malha A (64 pontos - 3,0 pontos/ha, custo igual a R\$130,50).

Portanto, para as condições e as avaliações do presente trabalho, recomenda-se a utilização de 2,0 pontos/ha para amostragem em cafeicultura de precisão.

Na avaliação de um conjunto de malhas amostrais, Ferraz (2012) encontrou, como mais indicada, a malha de três pontos por hectare, quando analisadas algumas variáveis de fertilidade do solo (P, P-rem, K e T) da mesma lavoura cafeeira utilizada no presente trabalho, para o ano de 2011. A diferença entre as recomendações pode ser justificada devido à quantidade de variáveis avaliadas em cada trabalho.

Em outros estudos também foram realizadas avaliações comparativas na determinação de malhas amostrais para diferentes variáveis.

Para 30 áreas agrícolas manejadas no sistema plantio direto no Rio Grande do Sul, cultivadas com milho e soja nas safras de verão e aveia branca, aveia preta e nabo forrageiro, nas safras de inverno, Cherubin et al. (2014) avaliaram três malhas de amostragem (uma amostra para cada um, dois e três hectares) para o fósforo (P) e potássio (K) coletados de 0 a 10 cm de profundidade. Os autores observaram que é necessário o uso de malhas menores que as avaliadas, pelo fato de 33,33% das áreas avaliadas apresentarem efeito pepita puro ou comportamento aleatório das variáveis.

Em uma área de 725,9 hectares em sistema de cultivo mínimo, com plantio de soja na safra e milho na safrinha, Ragagnin, Sena Júnior e Silveira Neto (2010) estudaram a variabilidade e a dependência espacial da capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V%) e o efeito sobre a recomendação de corretivo de três intensidades simuladas de amostragem (154, 76 e 38 pontos). Os autores verificaram que, com a redução da intensidade de amostragem, resultava em diferenças na distribuição espacial da recomendação da calagem, sendo viável a sua adoção ao considerar a redução do custo econômico e a diferença entre a recomendação das malhas mais densas.

Em uma lavoura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, de 184 hectares, Nanni et al. (2011), em cinco malhas amostrais (uma amostra a cada 1; 2,07; 2,88; 3,75; e 7,20 hectares) avaliaram a dependência espacial das variáveis de solo fósforo (P), potássio (K), saturação de bases (V%), matéria orgânica (M.O.) e teor de argila. Os mapas de cada variável foram comparados, para as malhas propostas, por meio de estatística kappa. Os autores verificaram que, para o P, K e V%, é necessário o uso de amostragem mais fina que a malha de uma amostra por hectare. Para a M.O. e teor de argila, é possível a utilização de uma amostragem mais grosseira (uma amostra para cada dois ou três hectares).

O uso de uma metodologia como a utilizada neste trabalho para a avaliação de diferentes malhas amostrais, é interessante, uma vez que não é necessária a criação de todos os mapas temáticos para determinar qual é a melhor malha. Dessa forma, faz-se necessário apenas realizar a análise geoestatística e a validação, para obter os valores para a determinação dos índices de avaliação das malhas.

3.1.2 Distribuição espacial das variáveis em função das malhas de amostragem

Com a finalidade de comparação visual, a distribuição espacial em função das malhas de amostragem de acordo com o ranqueamento, para as épocas de coleta, bem como os mapas de erro-padrão da predição, é apresentada nas Figuras 4 a 45, para as variáveis da fertilidade do solo; nas Figuras 46 a 63, para as variáveis da análise foliar; e nas Figuras 64 e 65, para a produtividade do cafeeiro. Em relação aos mapas de erro-padrão da predição, verificam-se erros-padrões menores próximos aos pontos amostrais. Entretanto, quanto menor a quantidade de pontos amostrais, aumenta-se os locais com maior erros-padrão.

Figura 4 - Distribuição espacial do pH em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

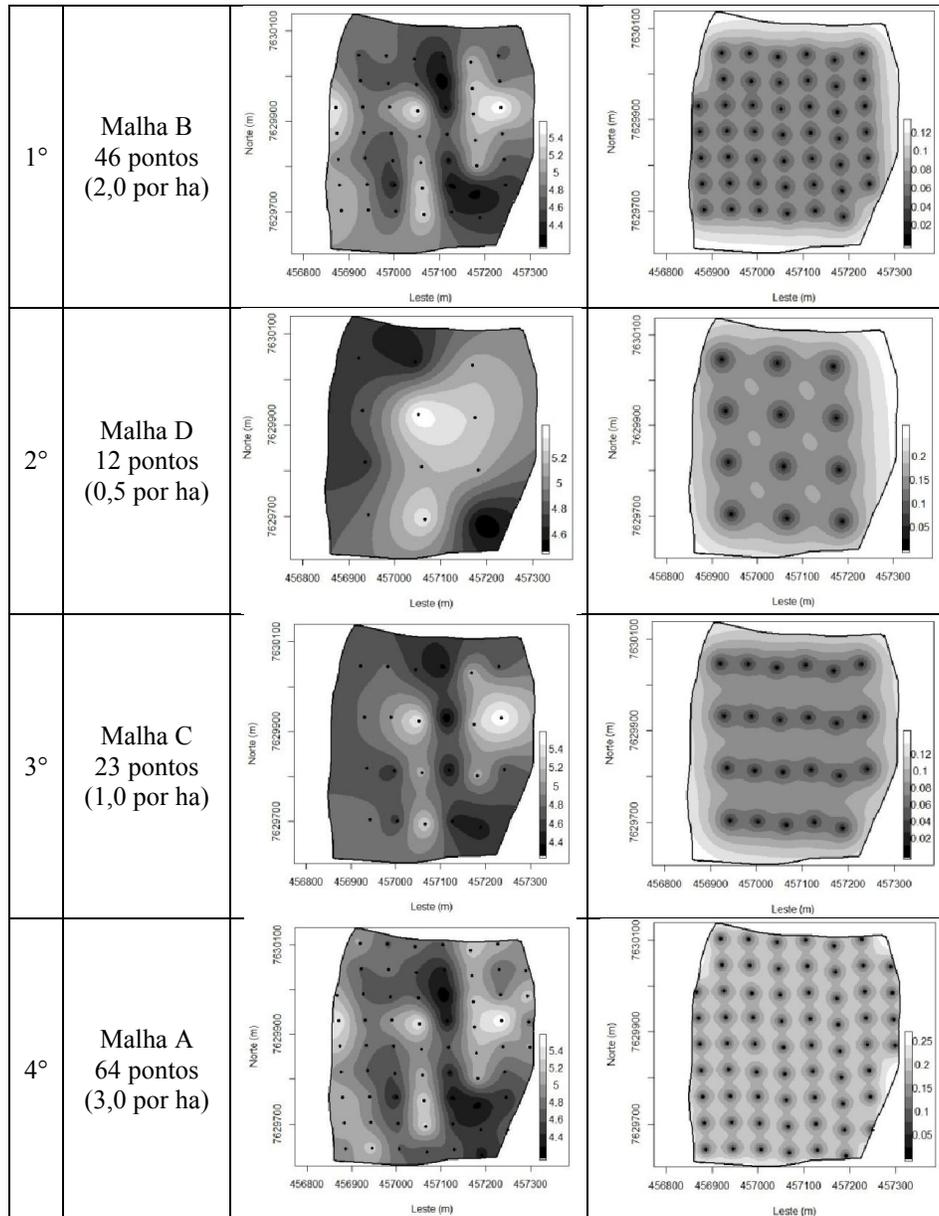


Figura 5 - Distribuição espacial do pH em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

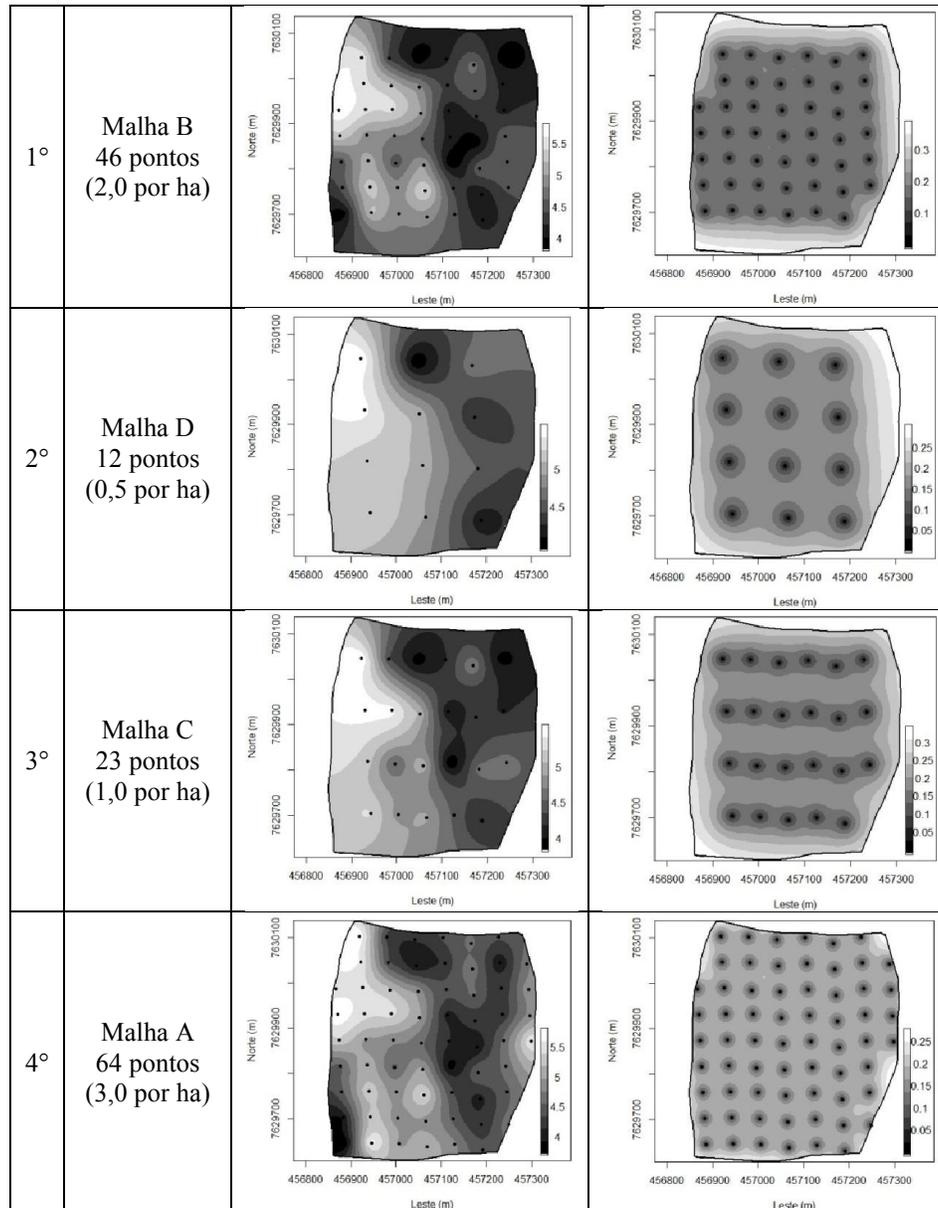


Figura 6 - Distribuição espacial do pH em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

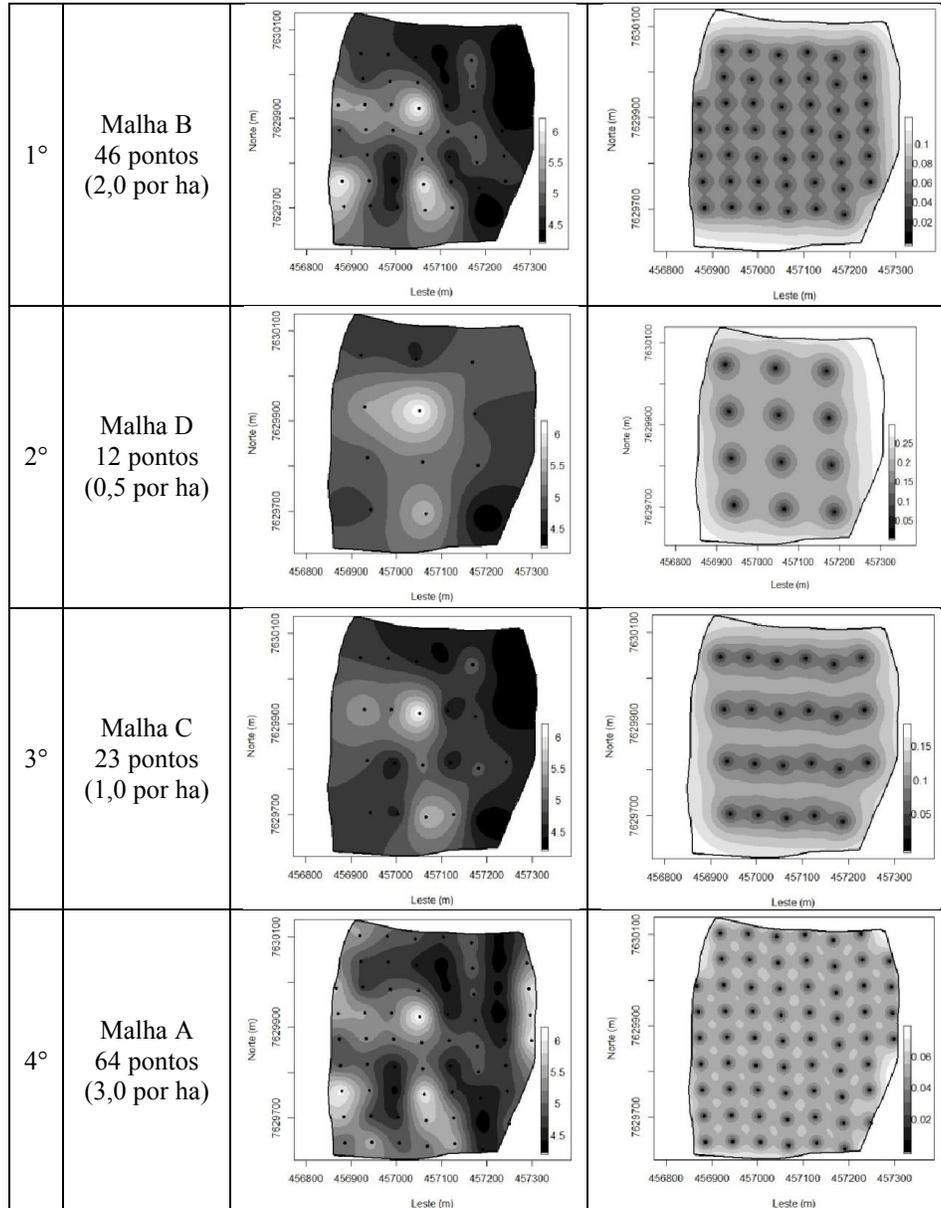


Figura 7 - Distribuição espacial do K (mg/dm^3) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

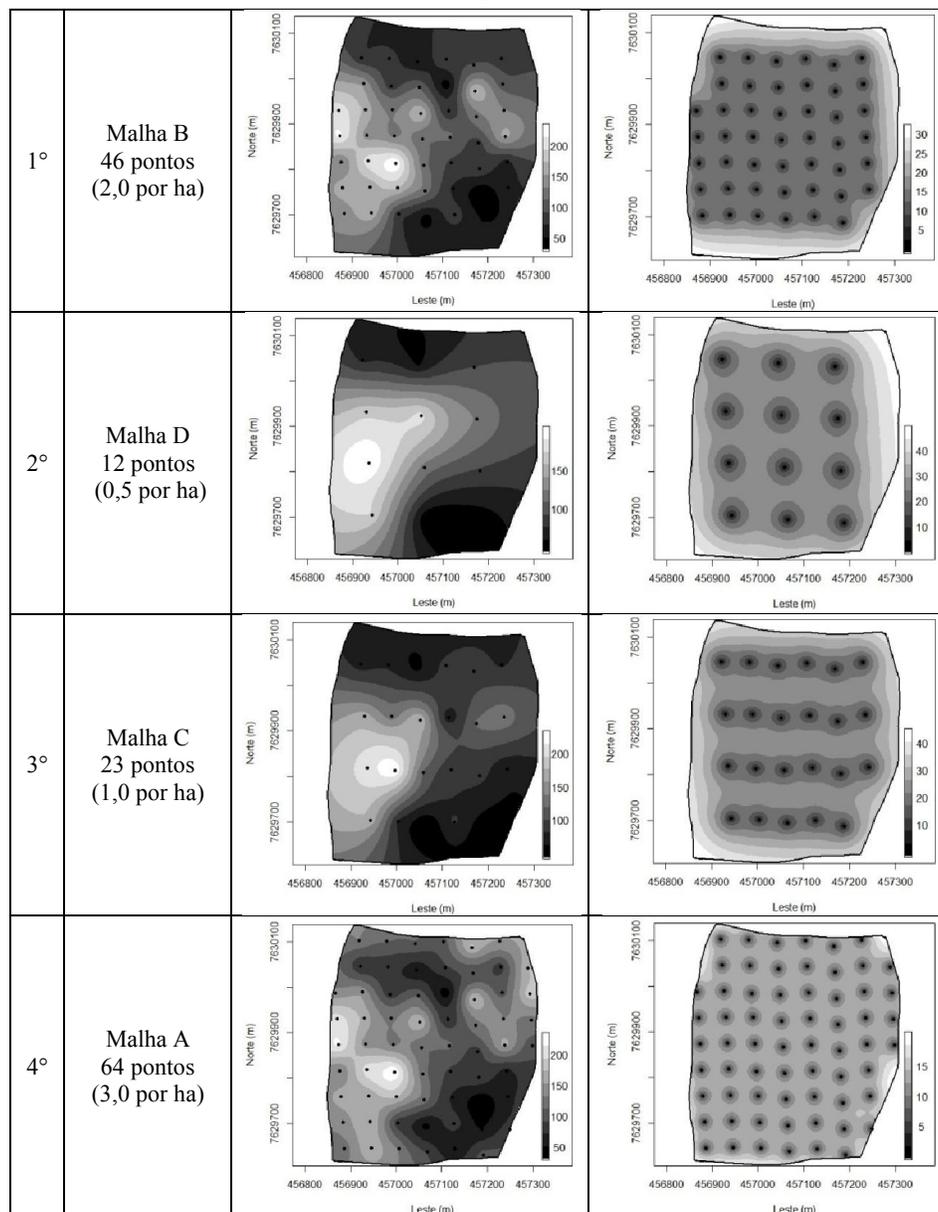


Figura 8 - Distribuição espacial do K (mg/dm^3) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

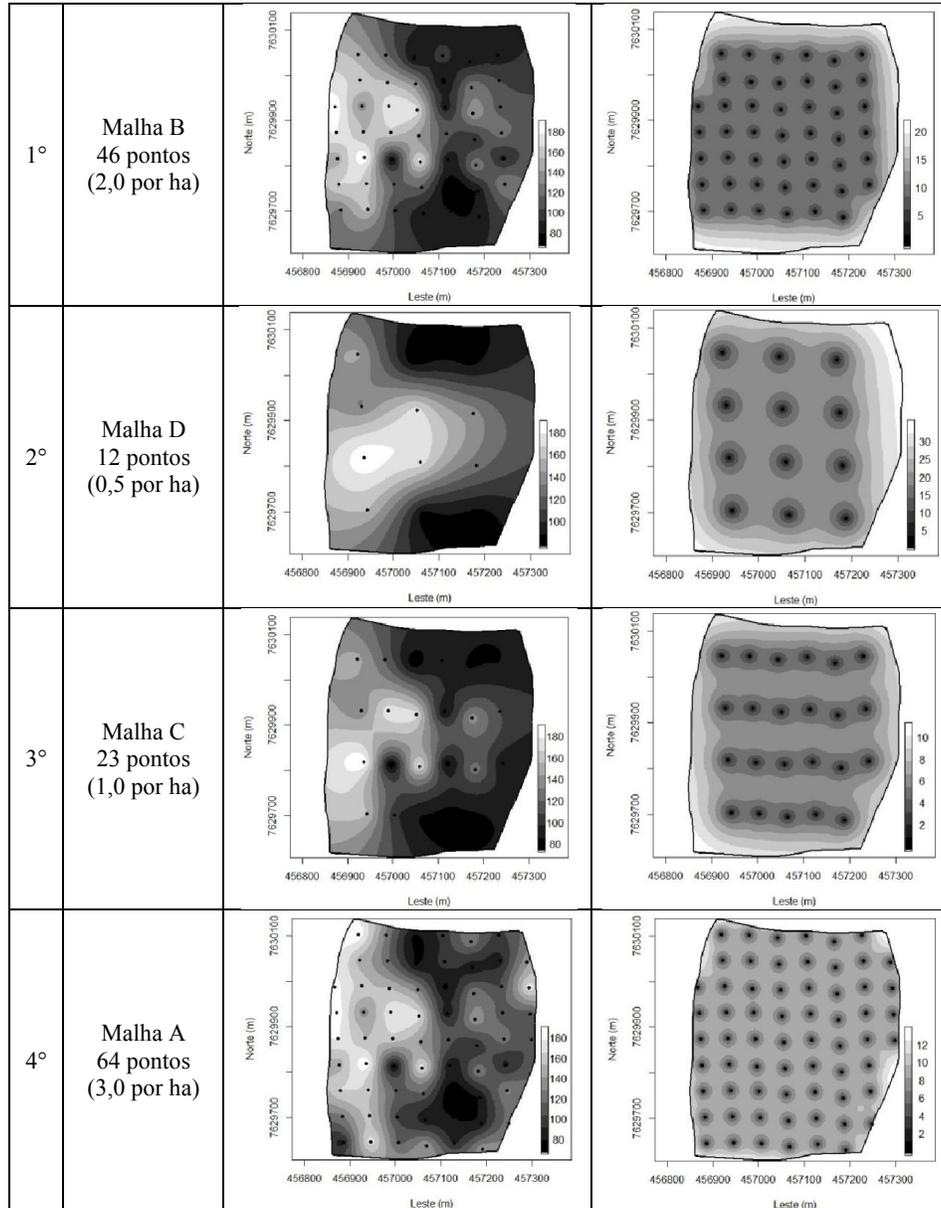


Figura 9 - Distribuição espacial do K (mg/dm^3) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

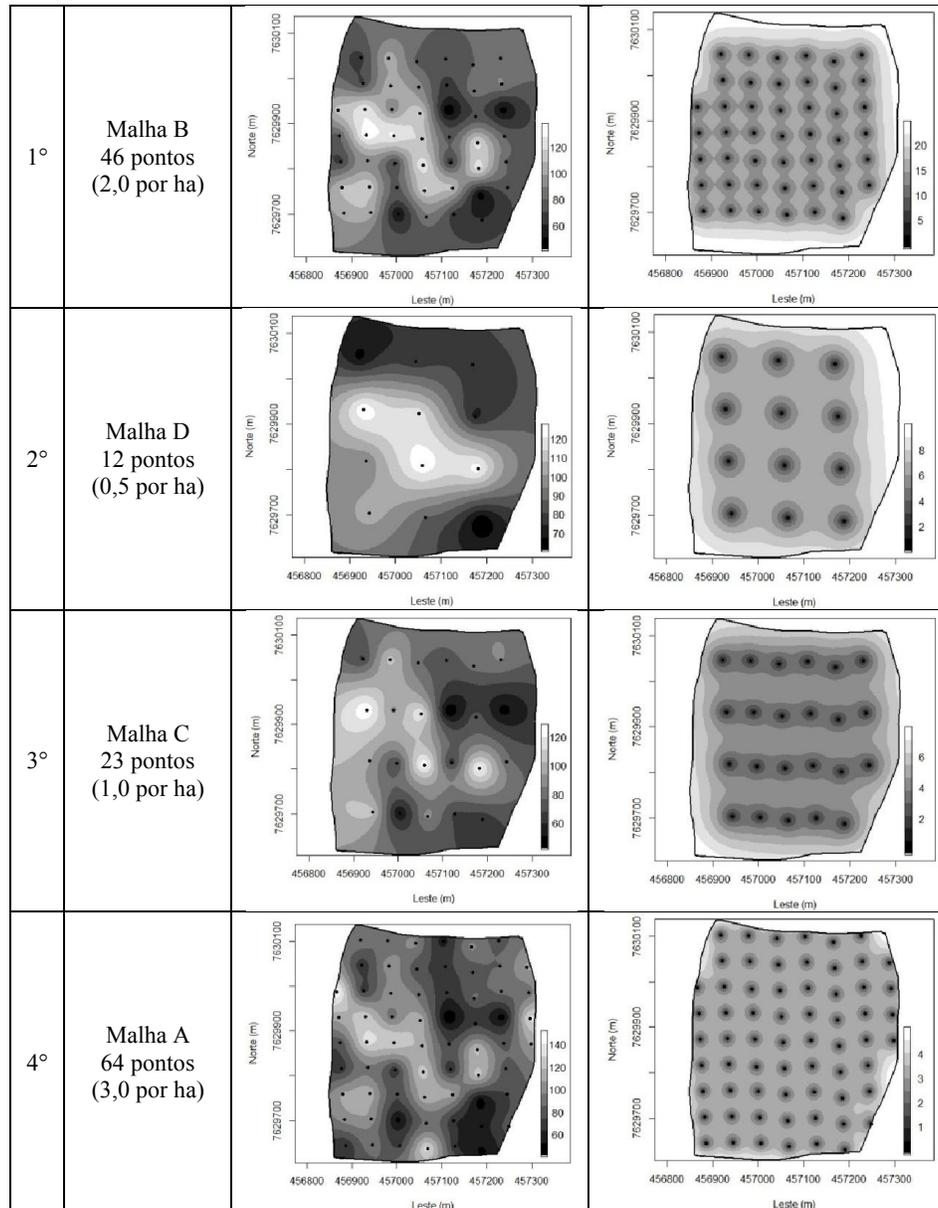


Figura 10 - Distribuição espacial do P (mg/dm^3) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

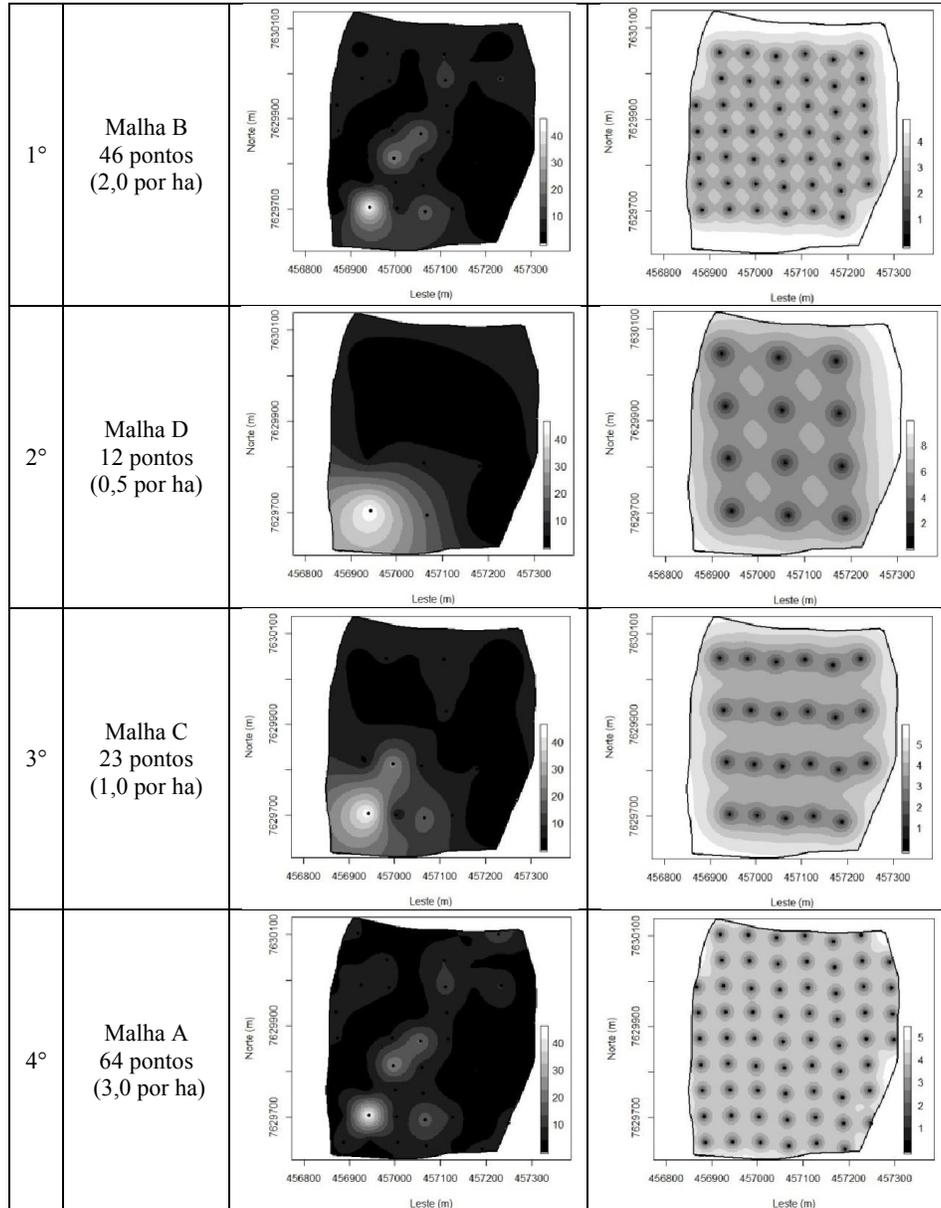


Figura 11 - Distribuição espacial do P (mg/dm^3) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

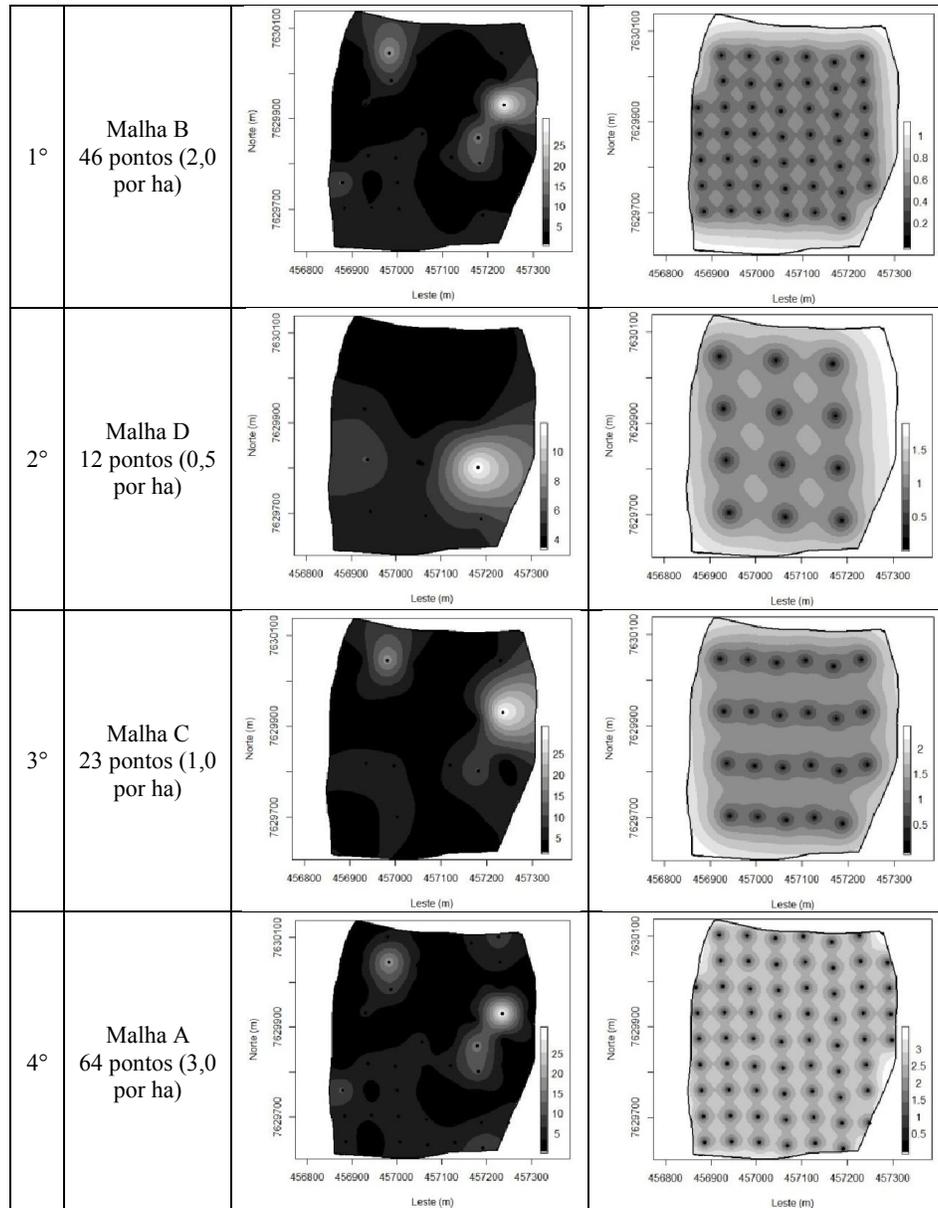


Figura 12 - Distribuição espacial do P (mg/dm^3) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

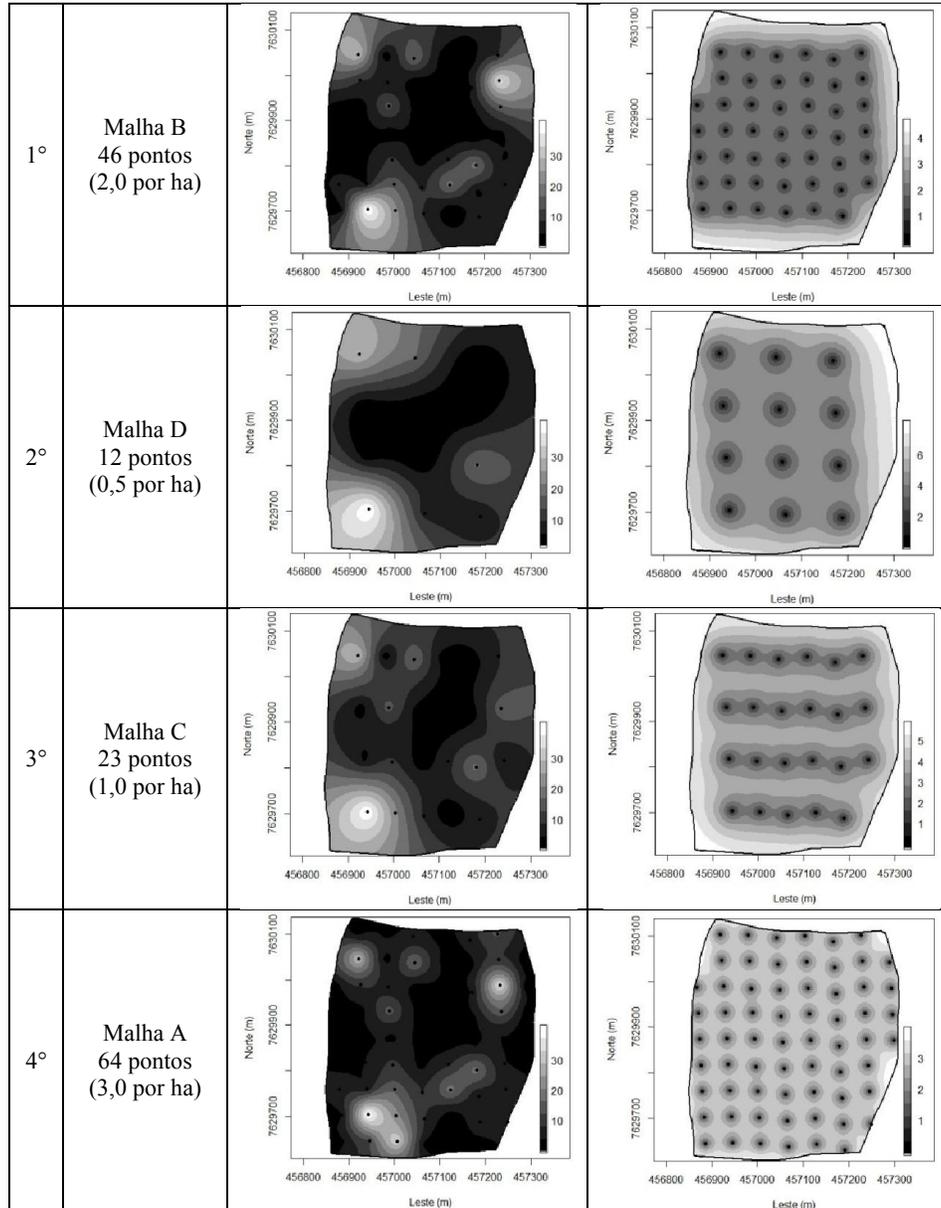


Figura 13 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

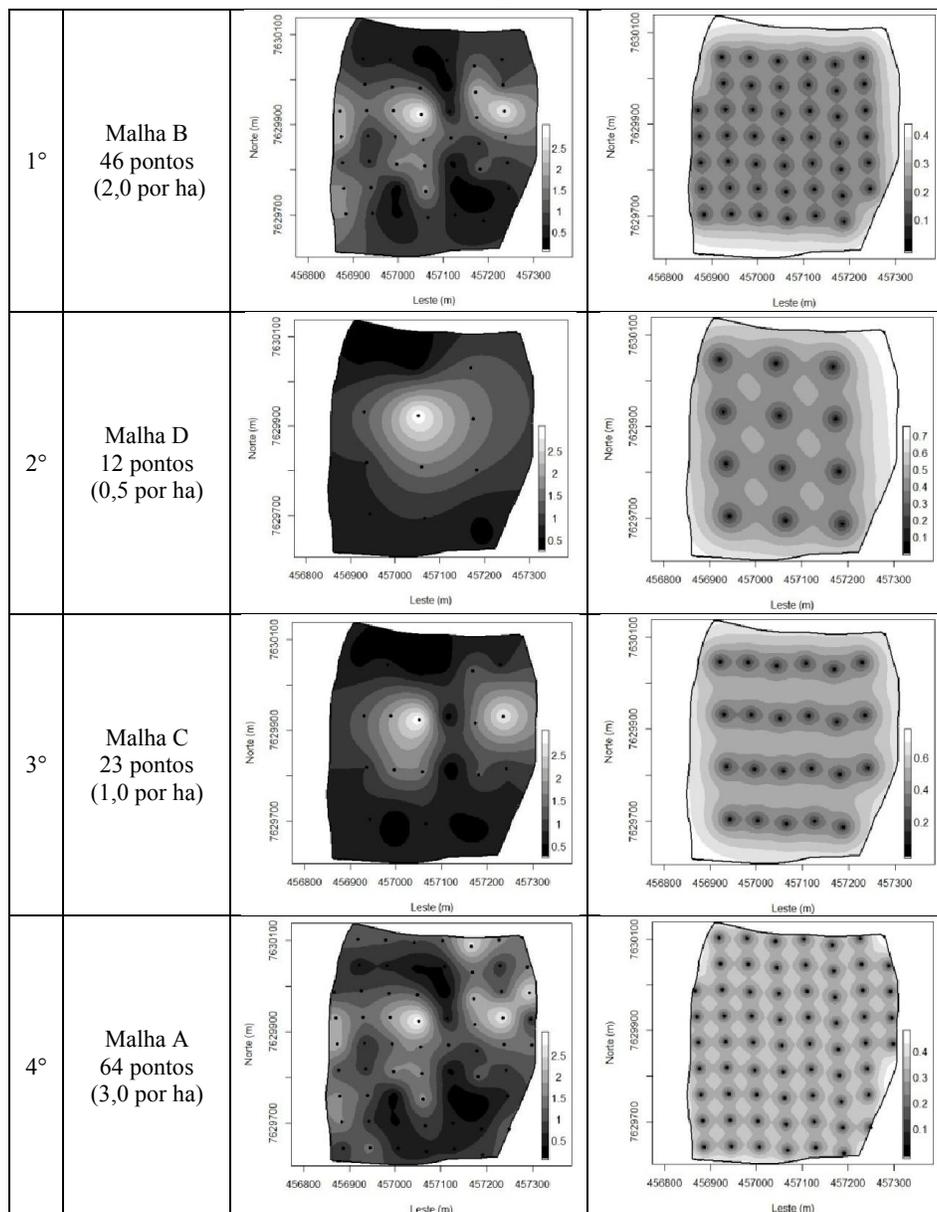


Figura 14 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

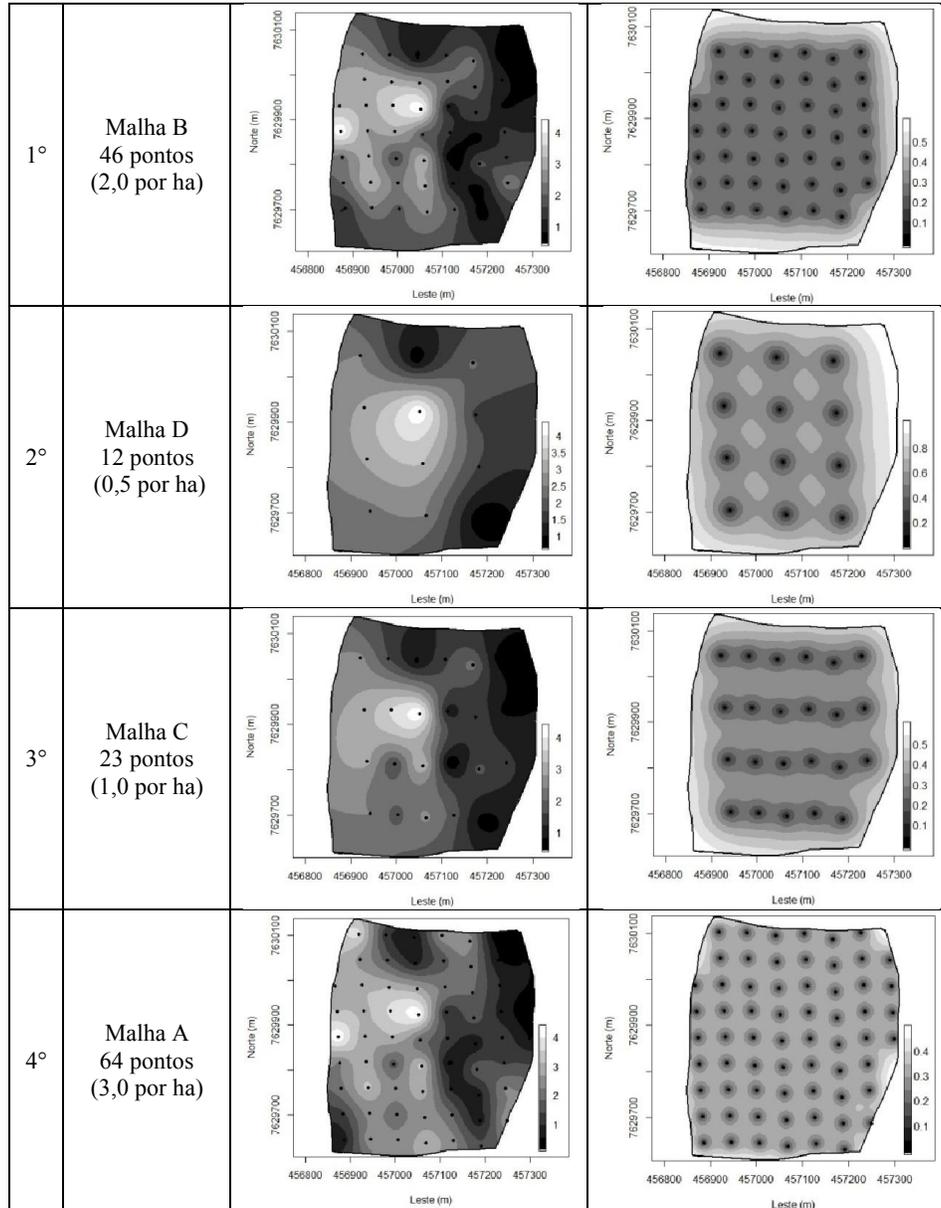


Figura 15 - Distribuição espacial do Ca ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

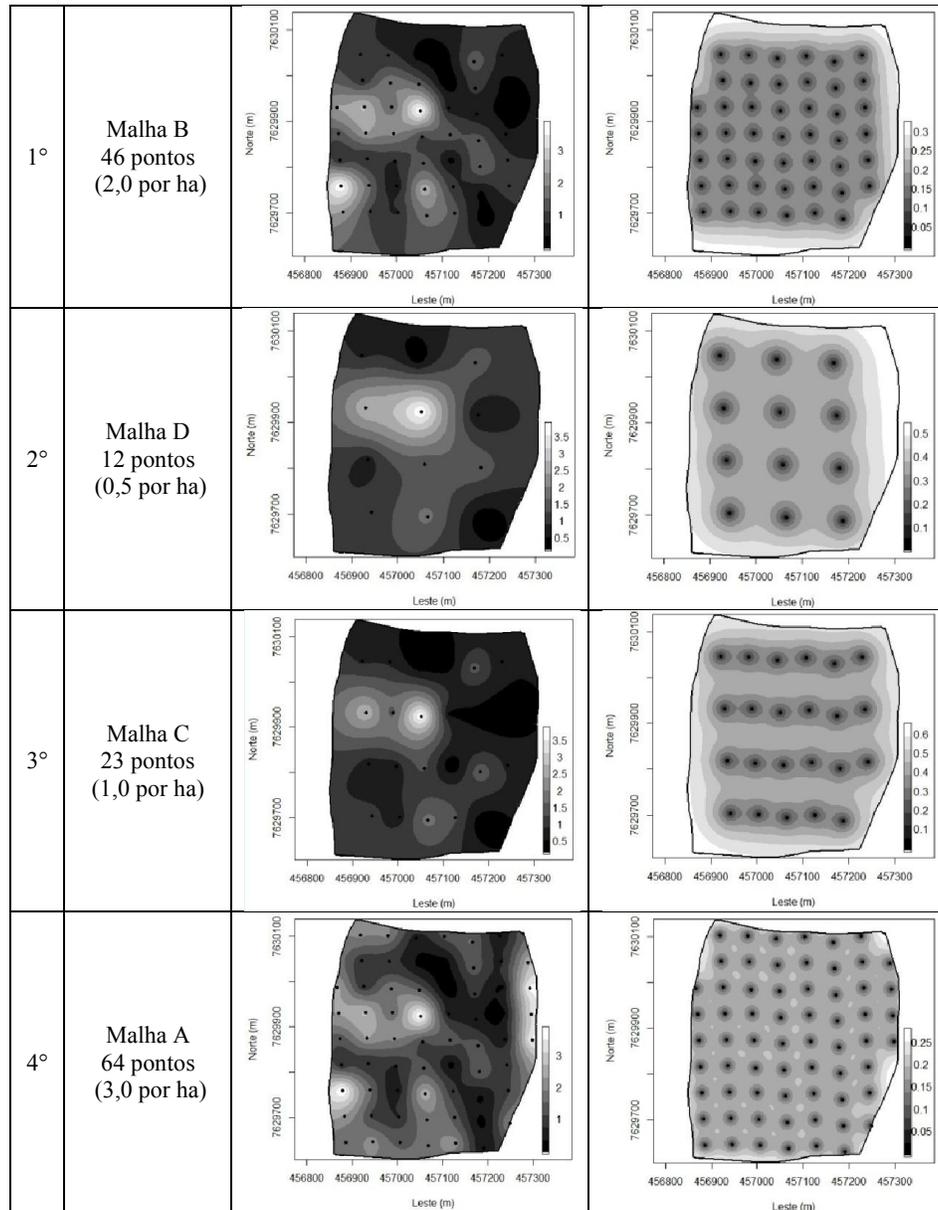


Figura 16 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

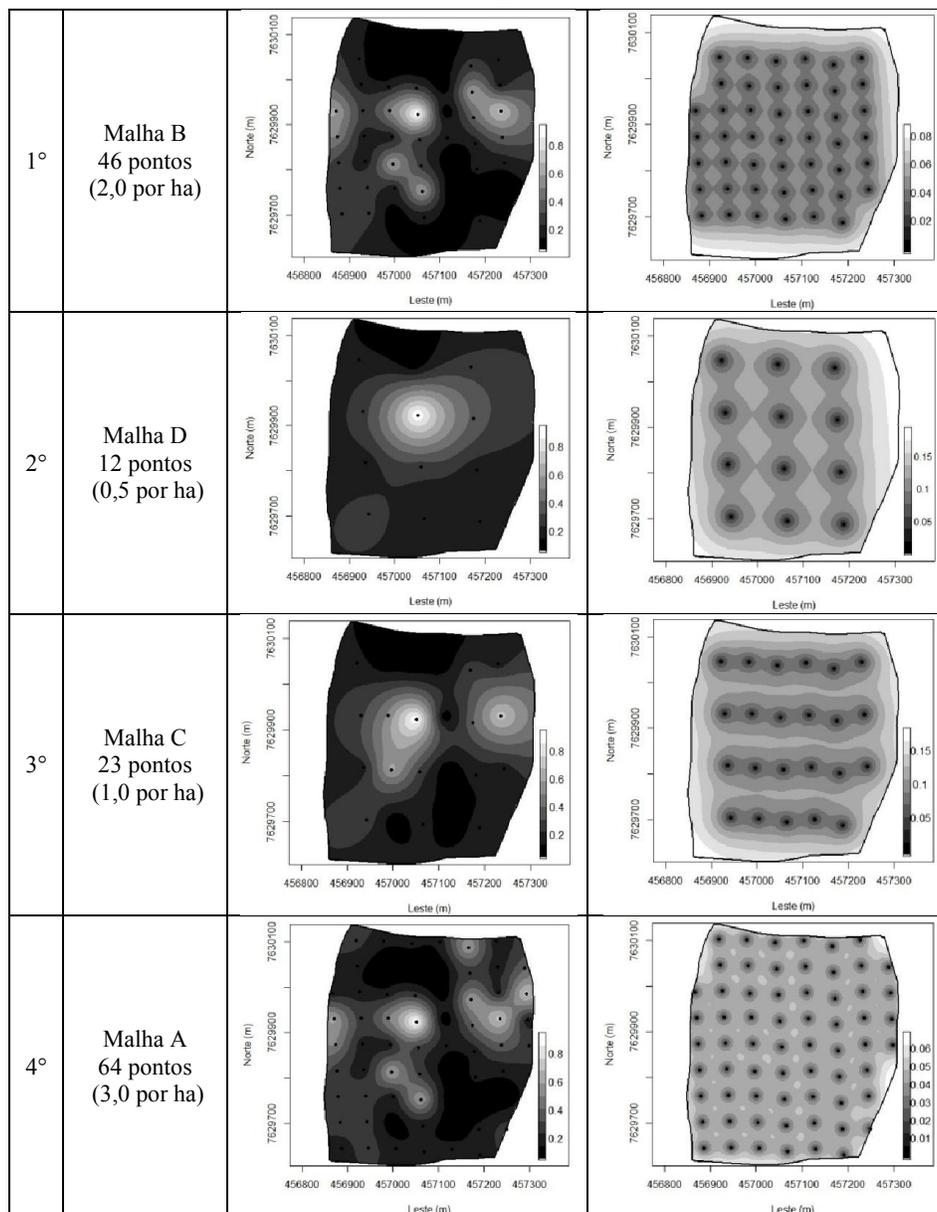


Figura 17 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

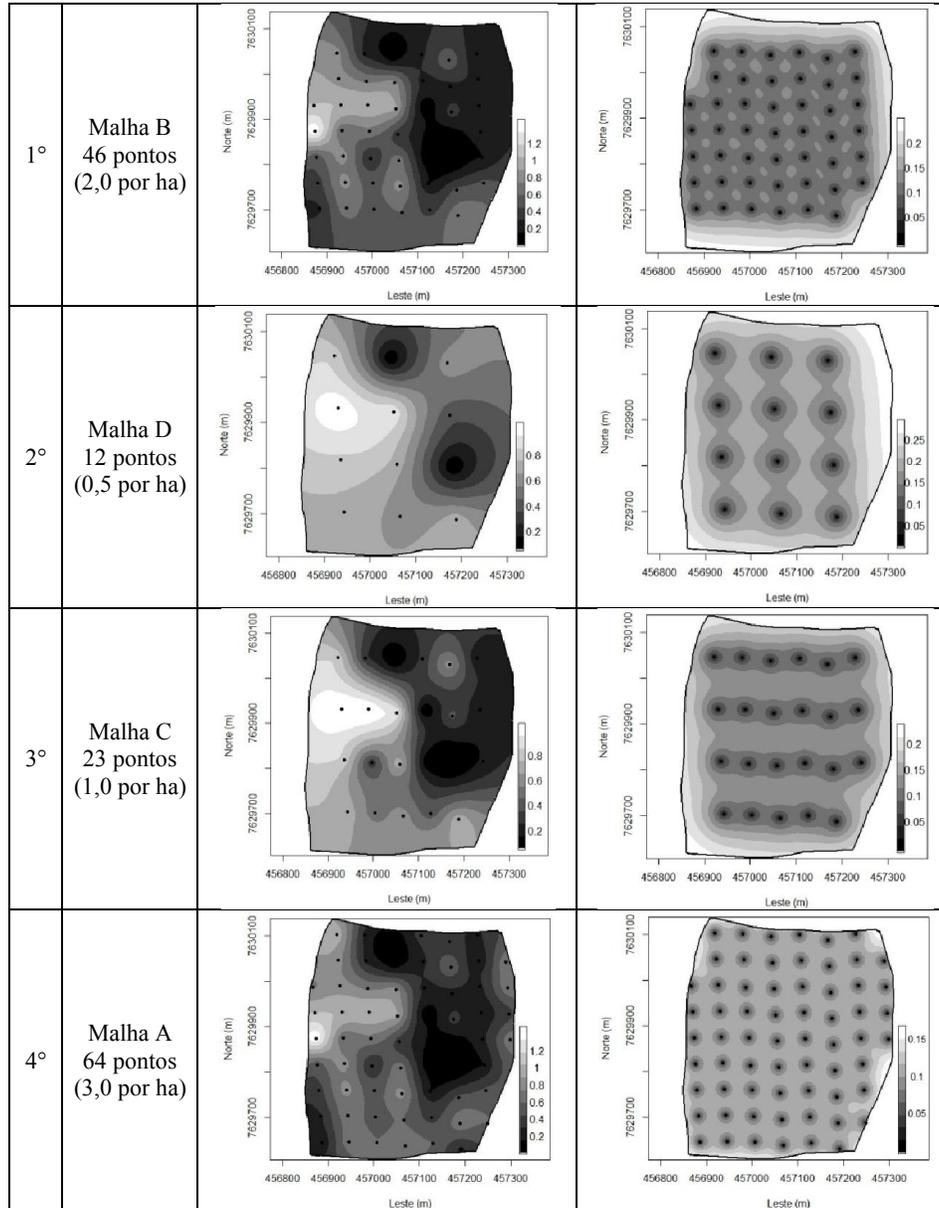


Figura 18 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

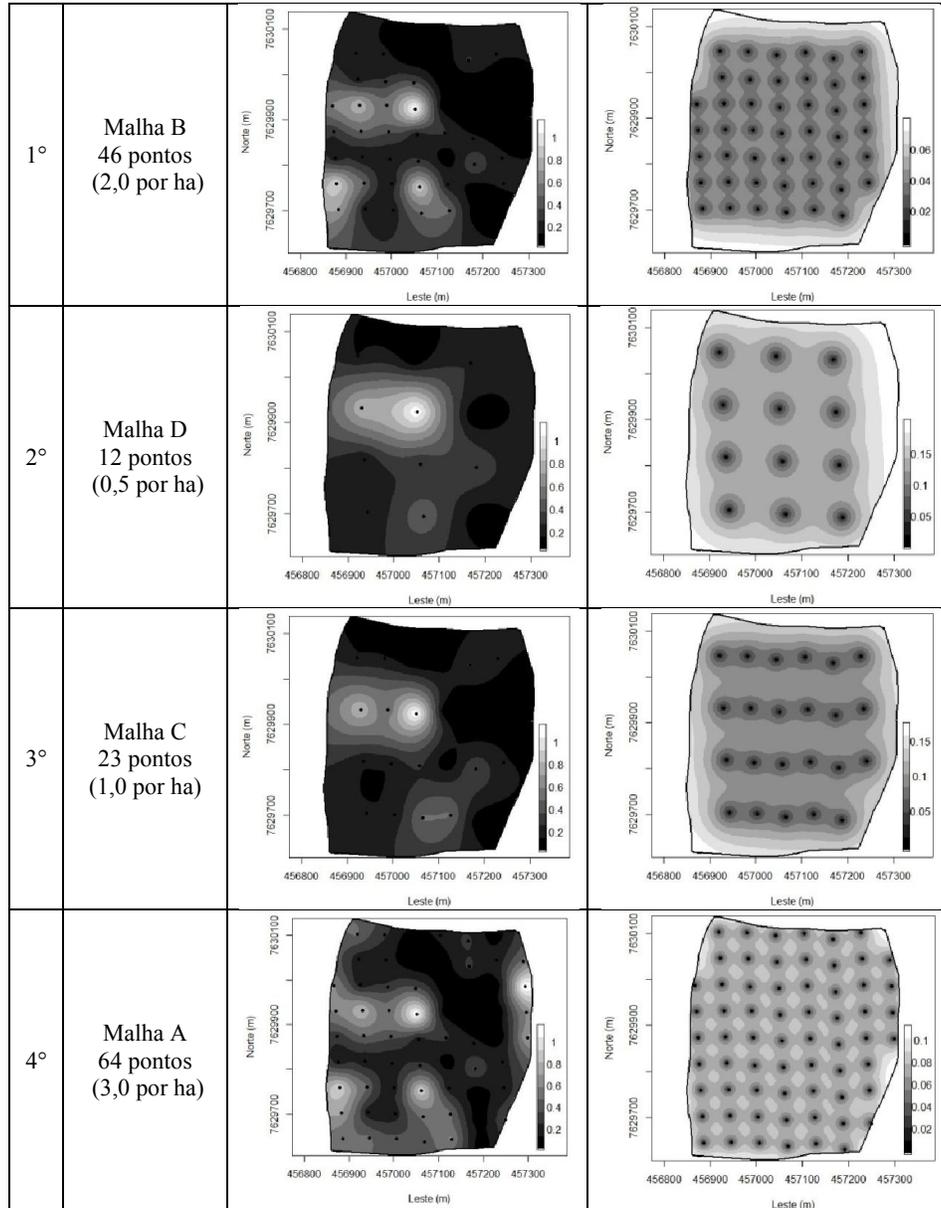


Figura 19 - Distribuição espacial do AI ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

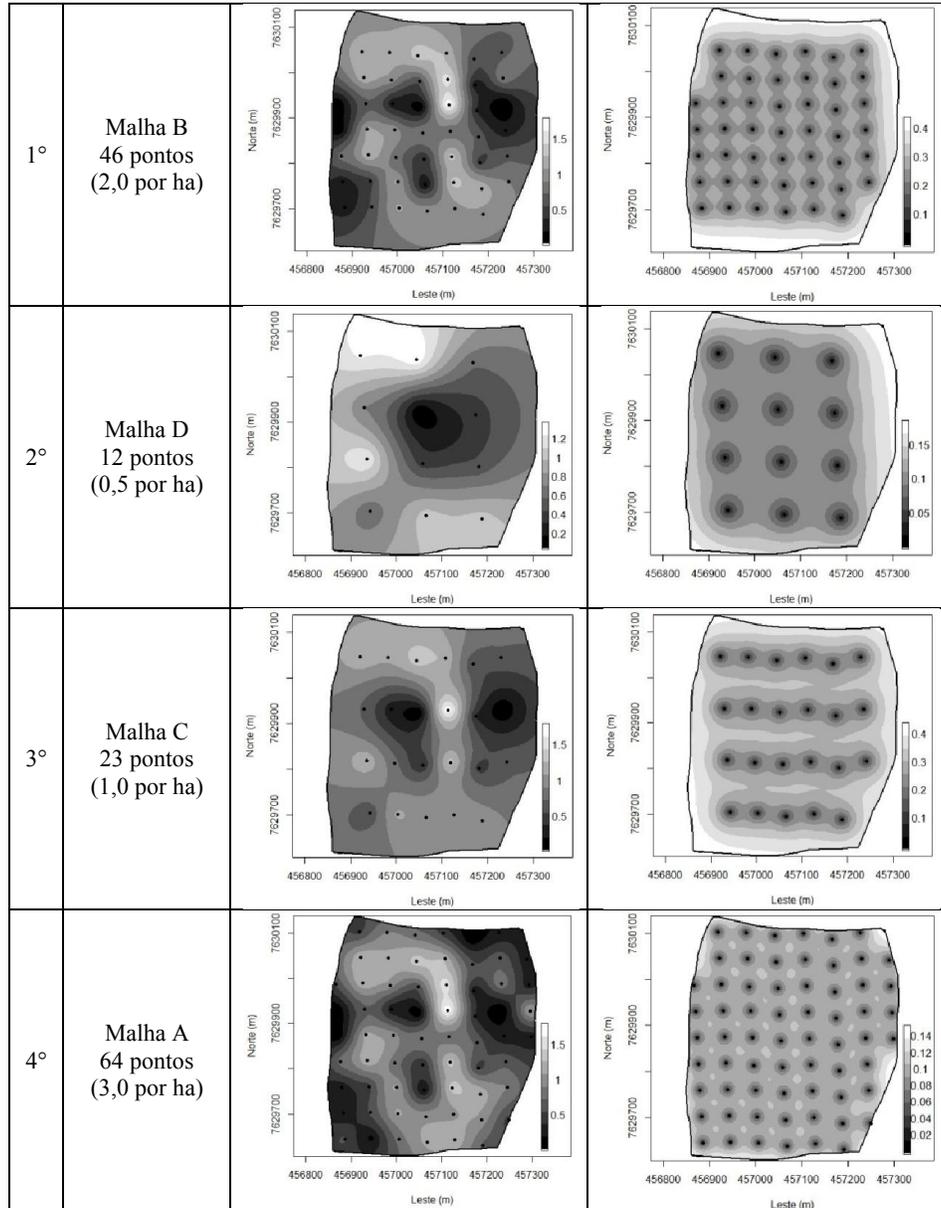


Figura 20 - Distribuição espacial do Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

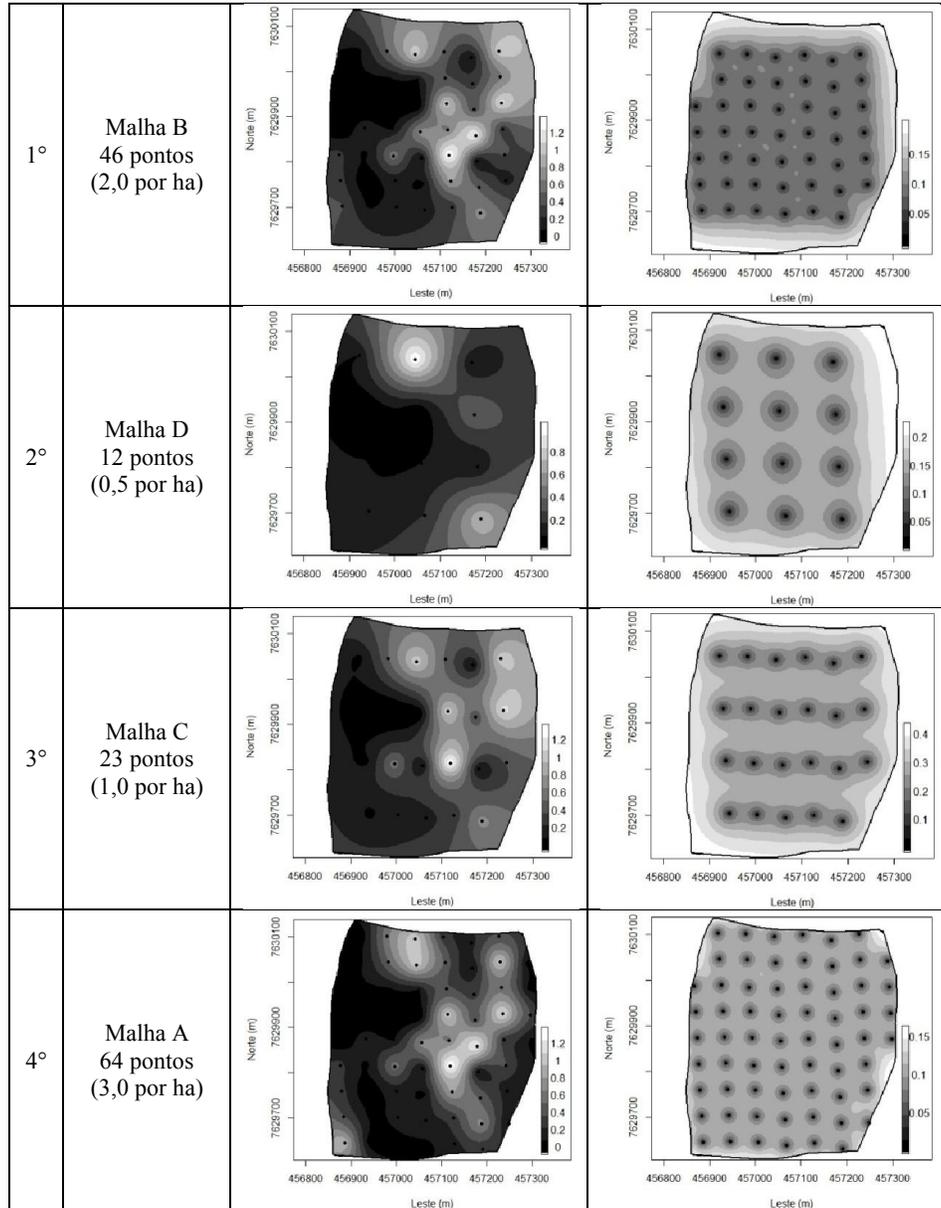


Figura 21 - Distribuição espacial do AI ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem

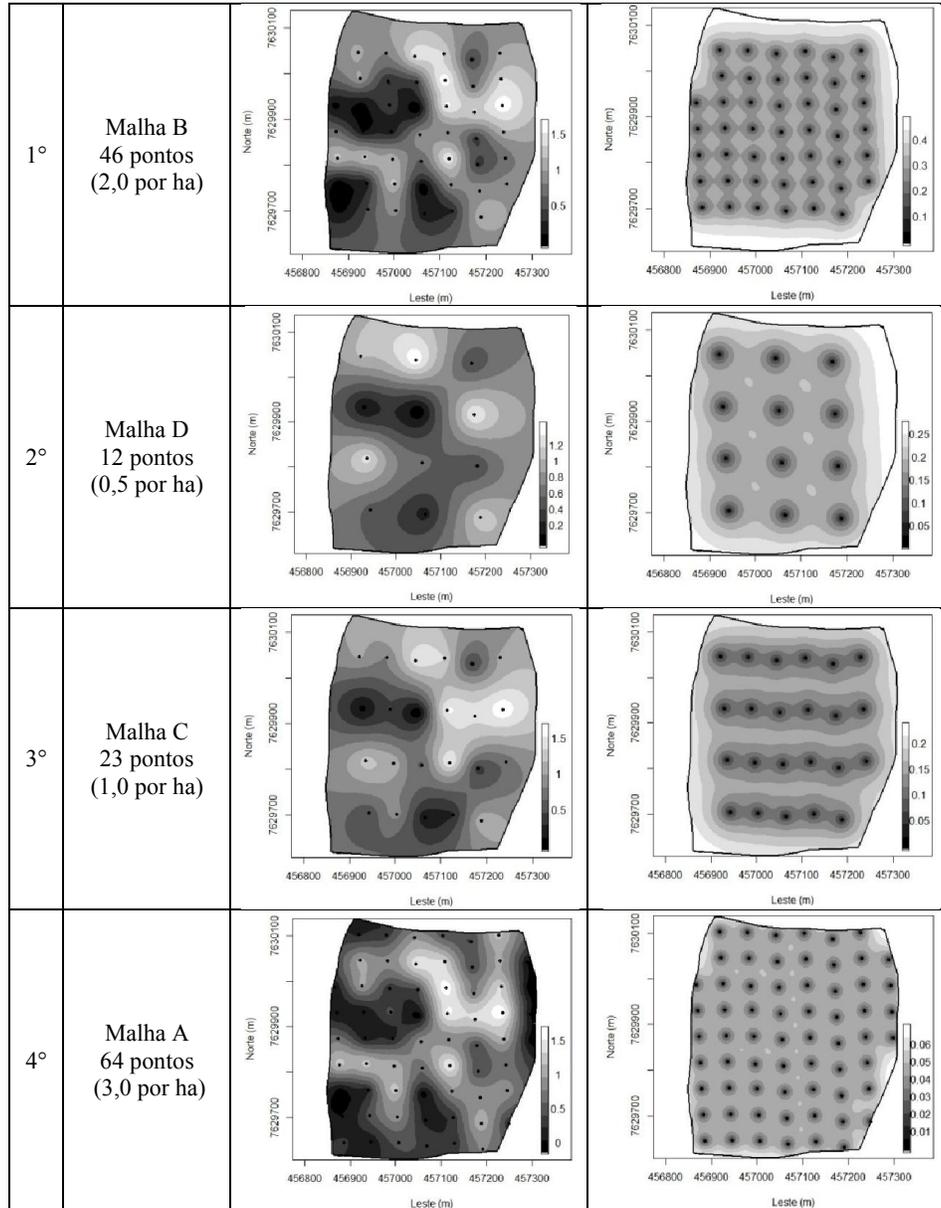


Figura 22 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

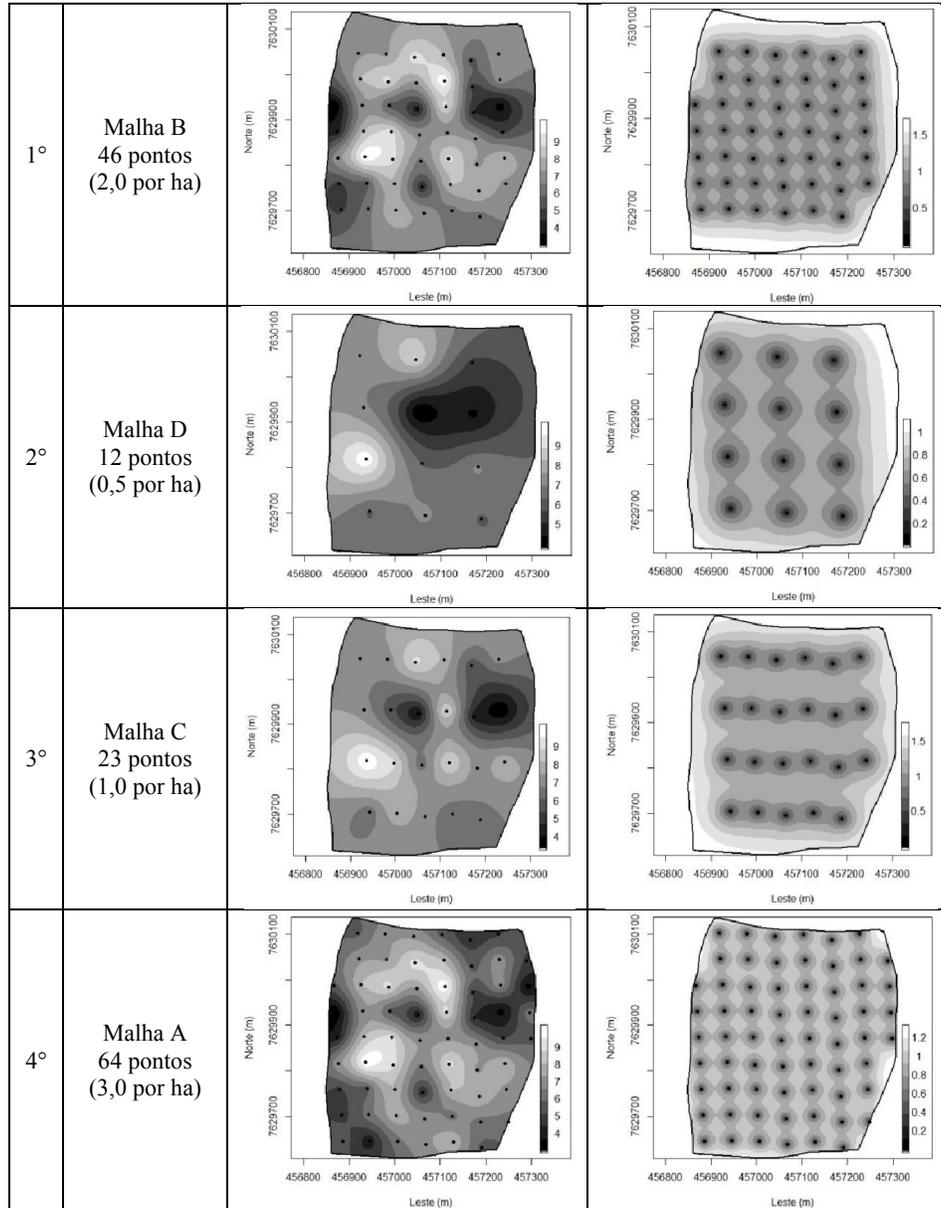


Figura 23 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

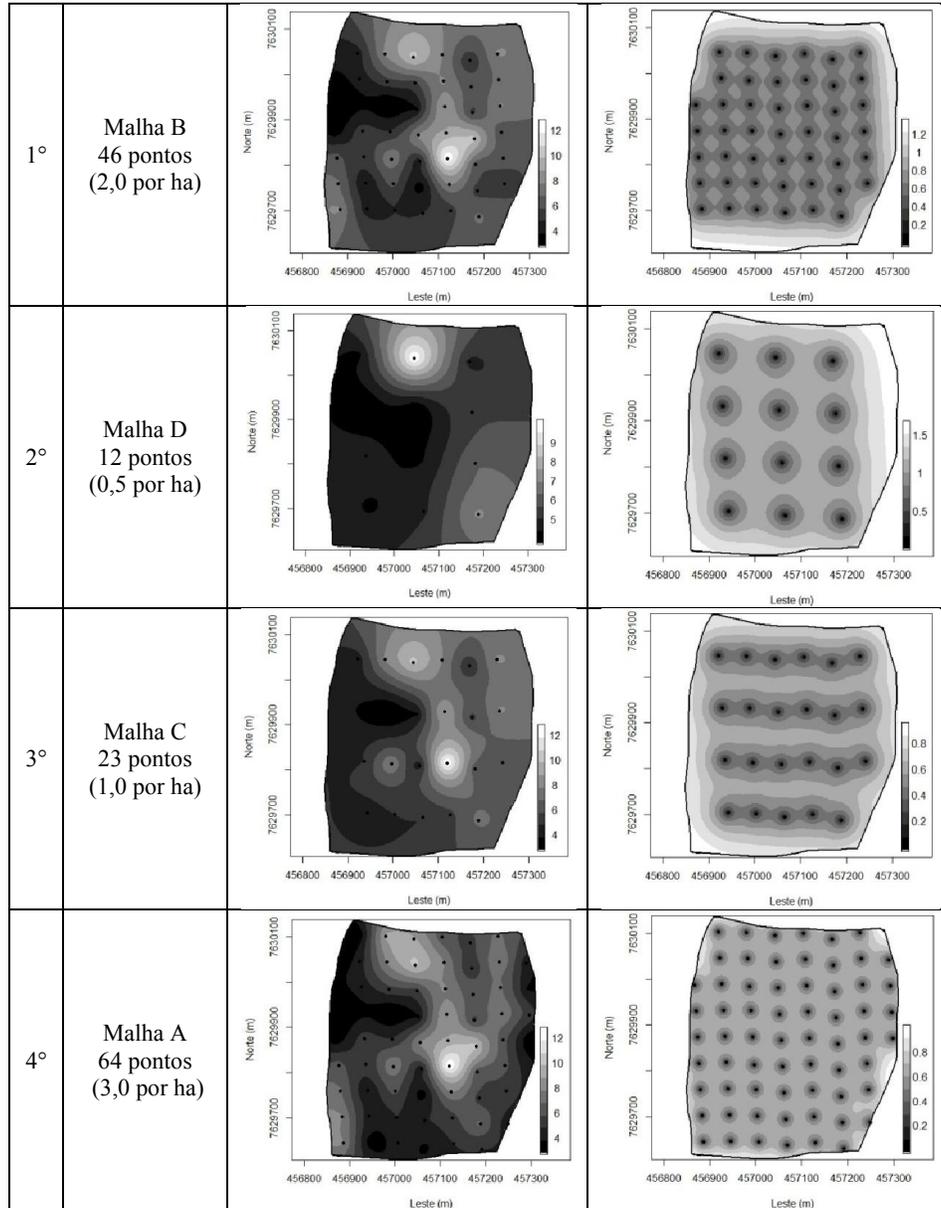


Figura 24 - Distribuição espacial do H+Al (cmol_c.dm⁻³) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

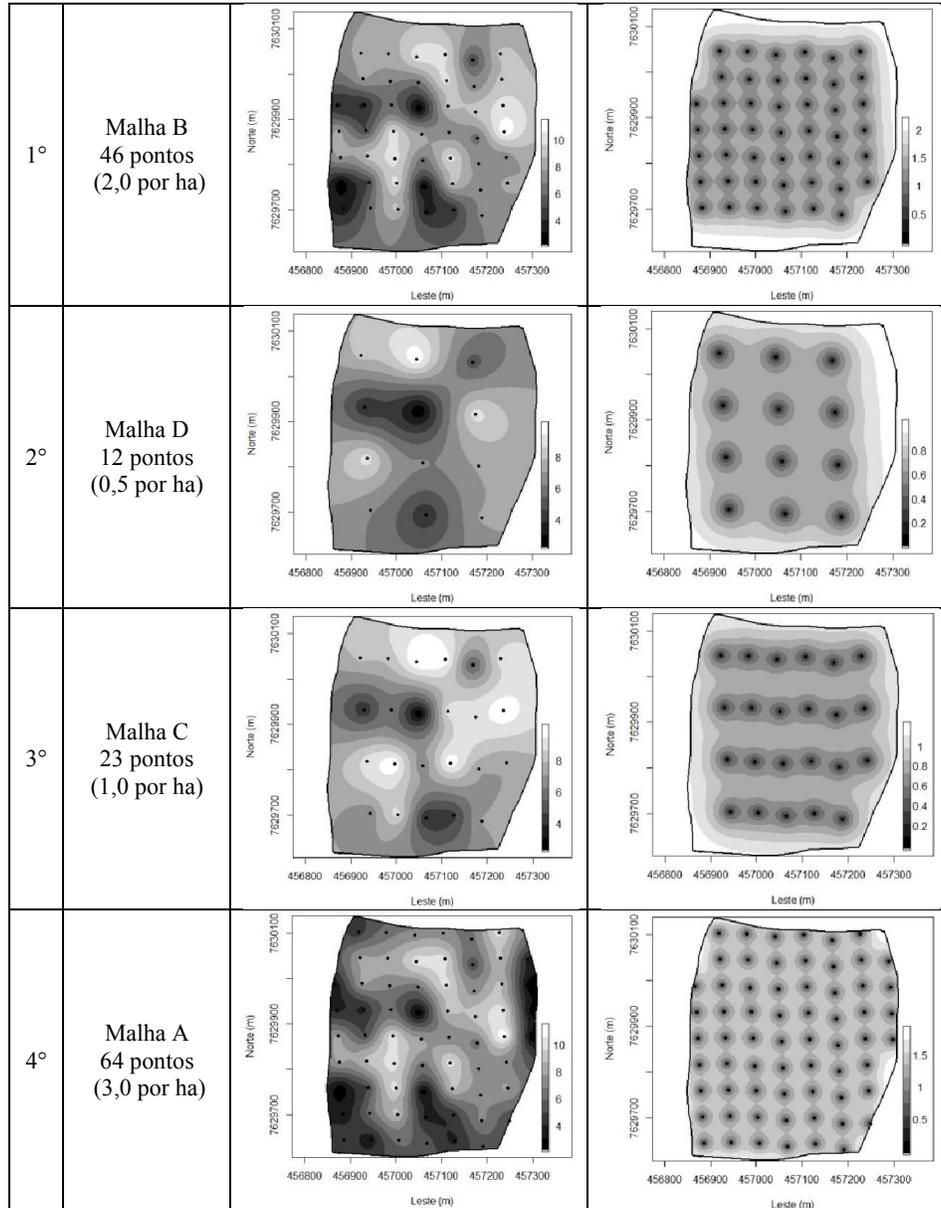


Figura 25 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

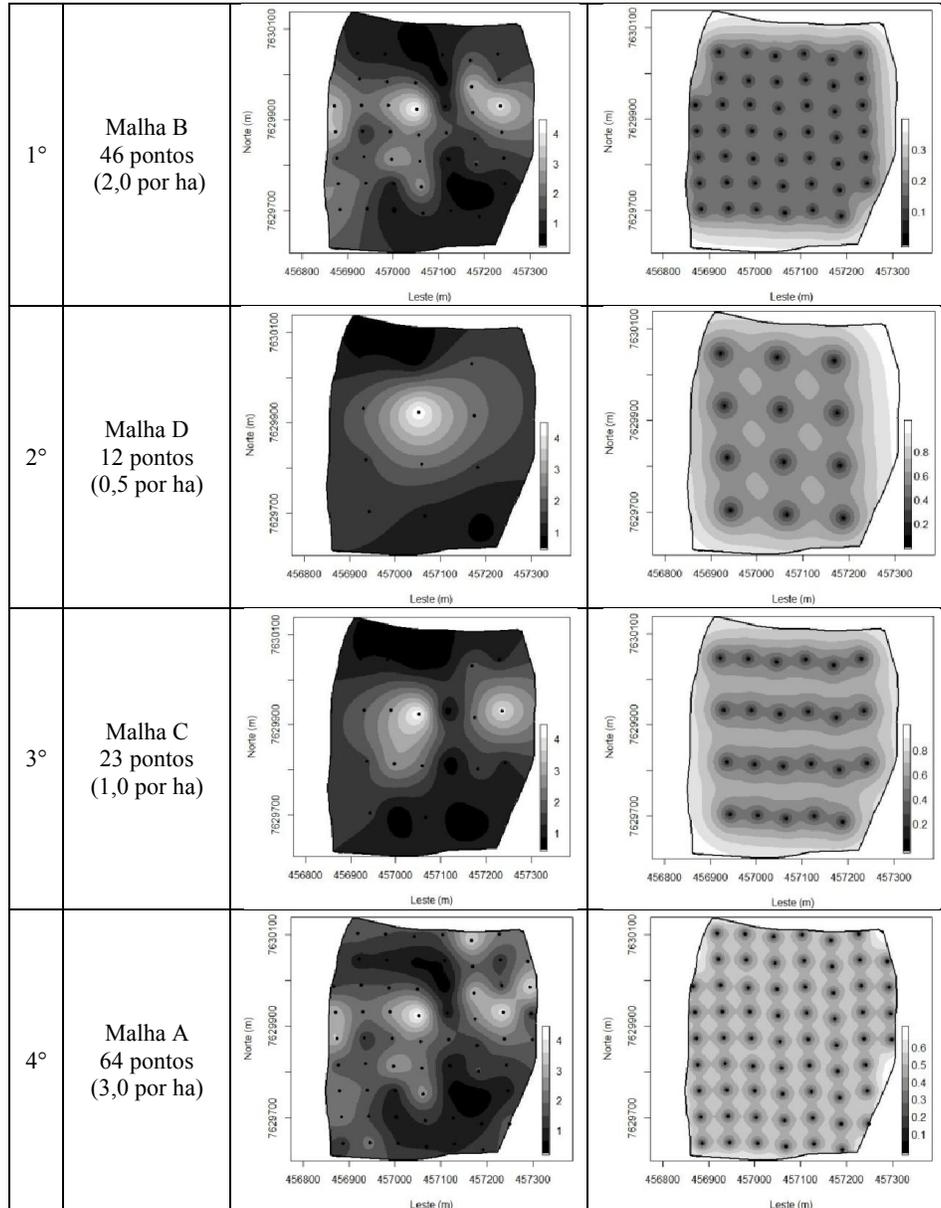


Figura 26 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

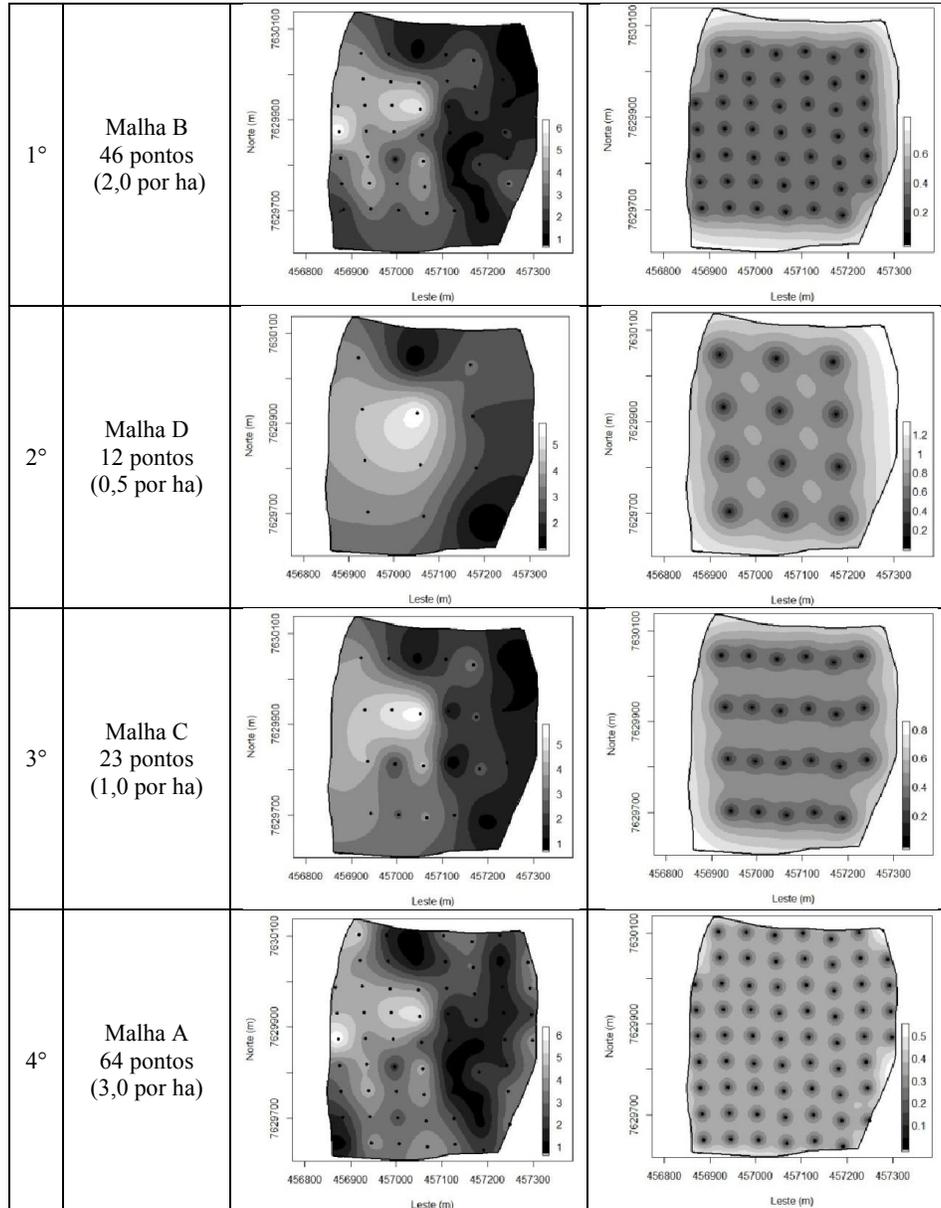


Figura 27 - Distribuição espacial da SB ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

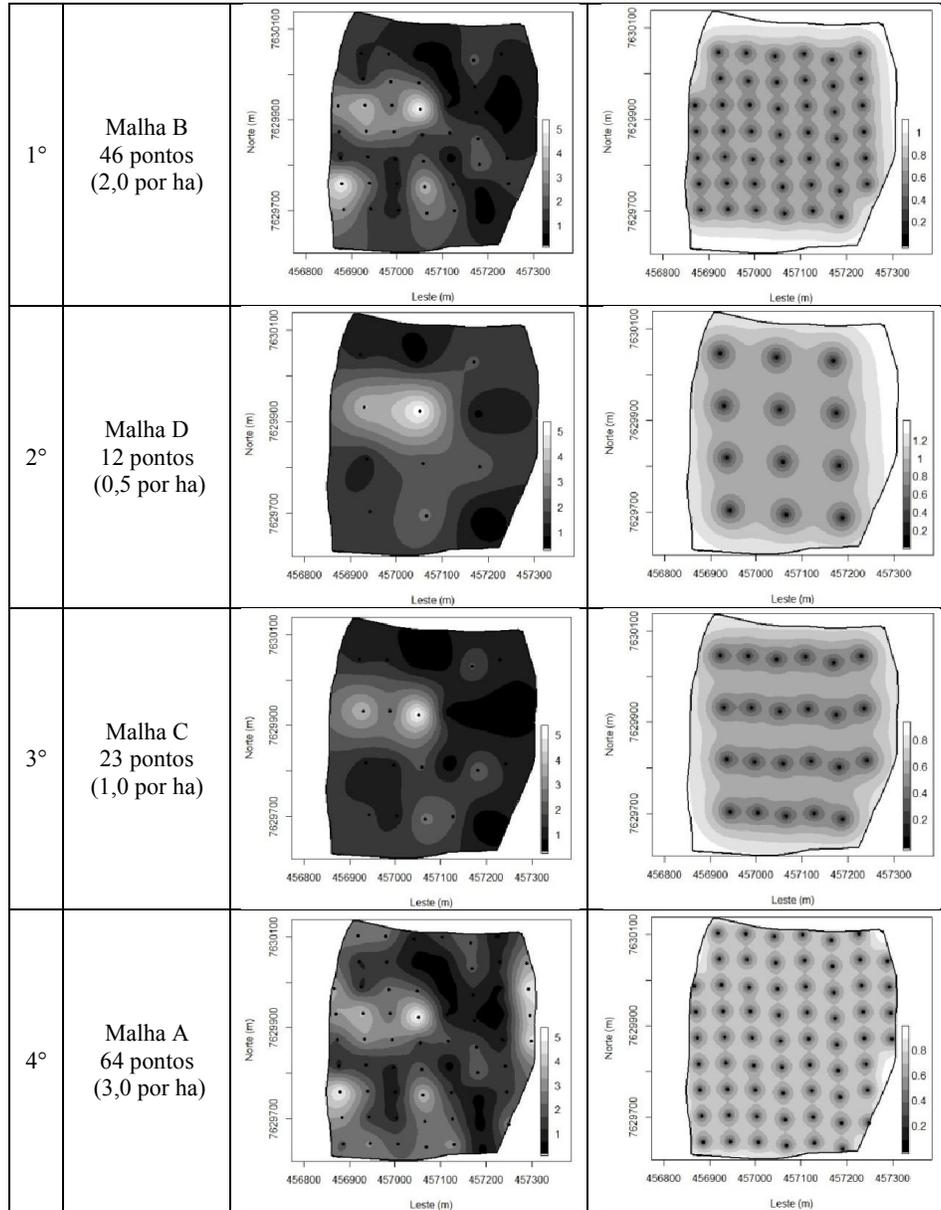


Figura 28 - Distribuição espacial da t (cmol.c.dm^{-3}) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

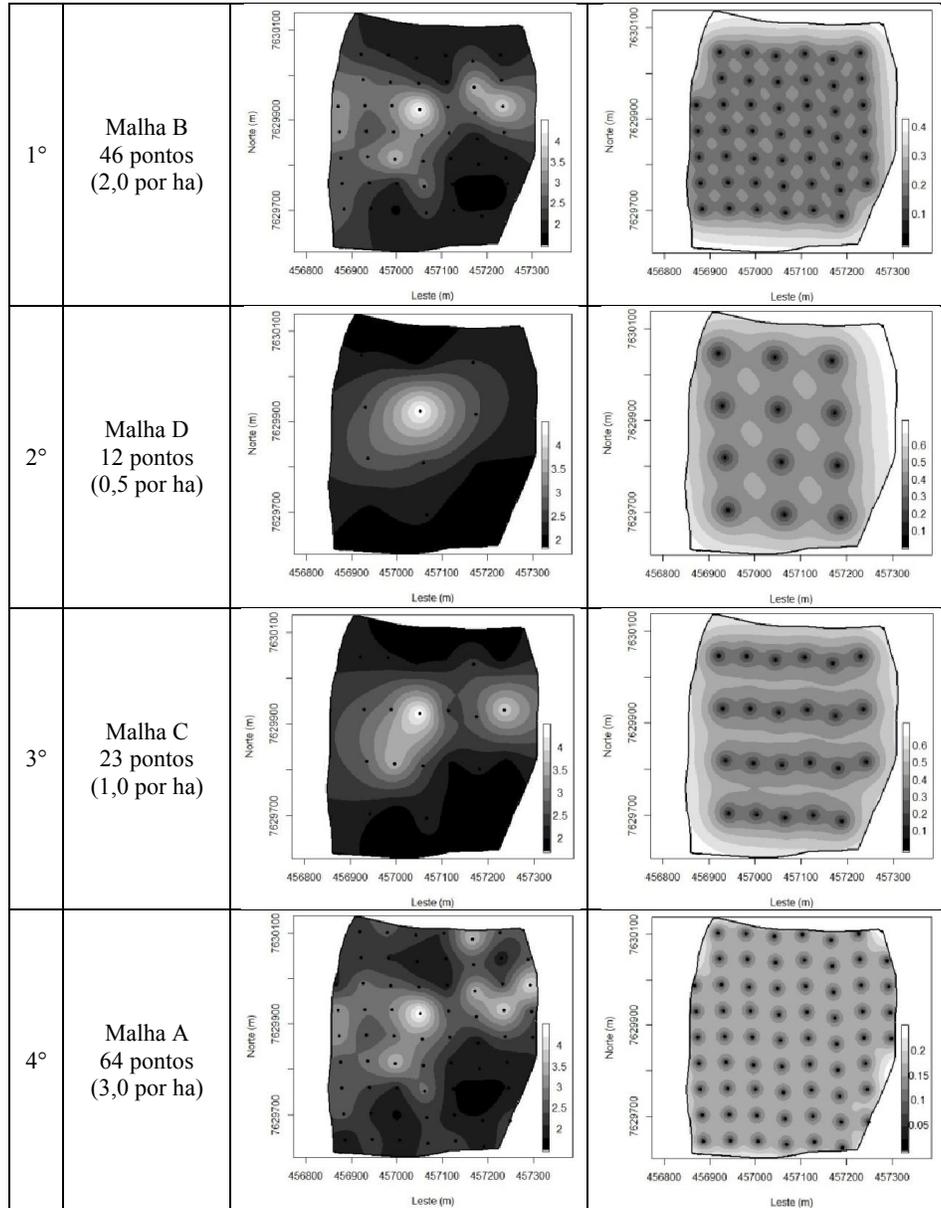


Figura 29 - Distribuição espacial da t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

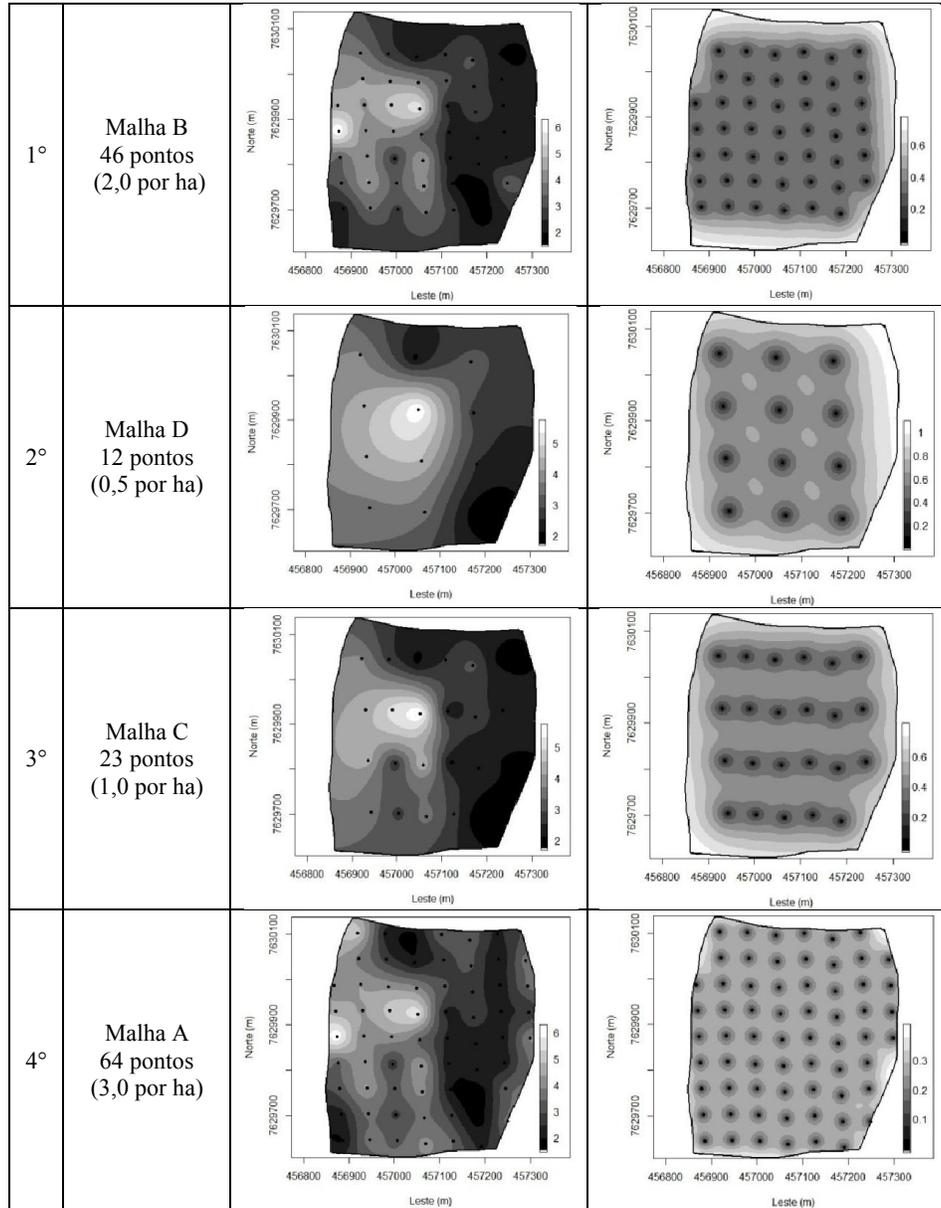


Figura 30 - Distribuição espacial da t (cmol.c.dm^{-3}) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

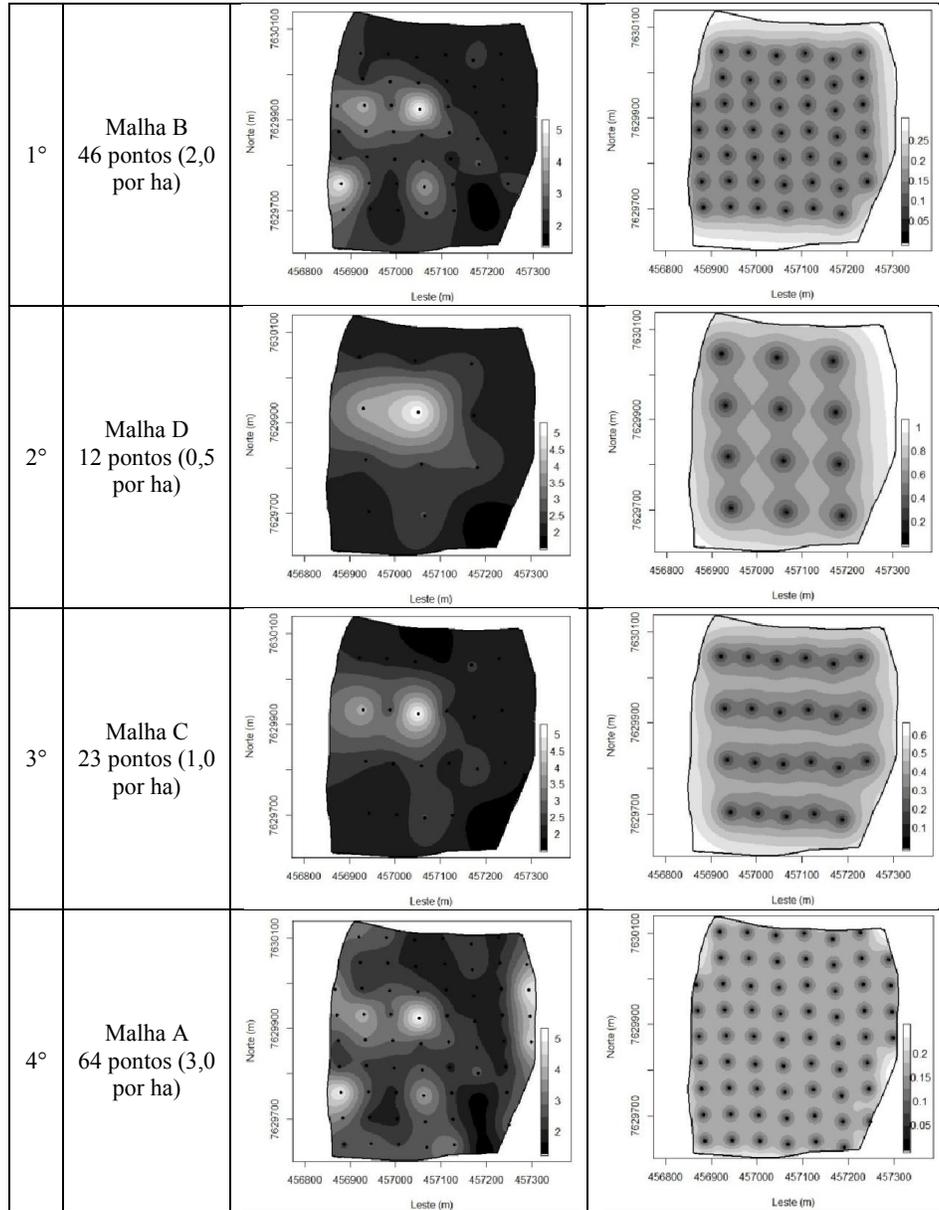


Figura 31 - Distribuição espacial da T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

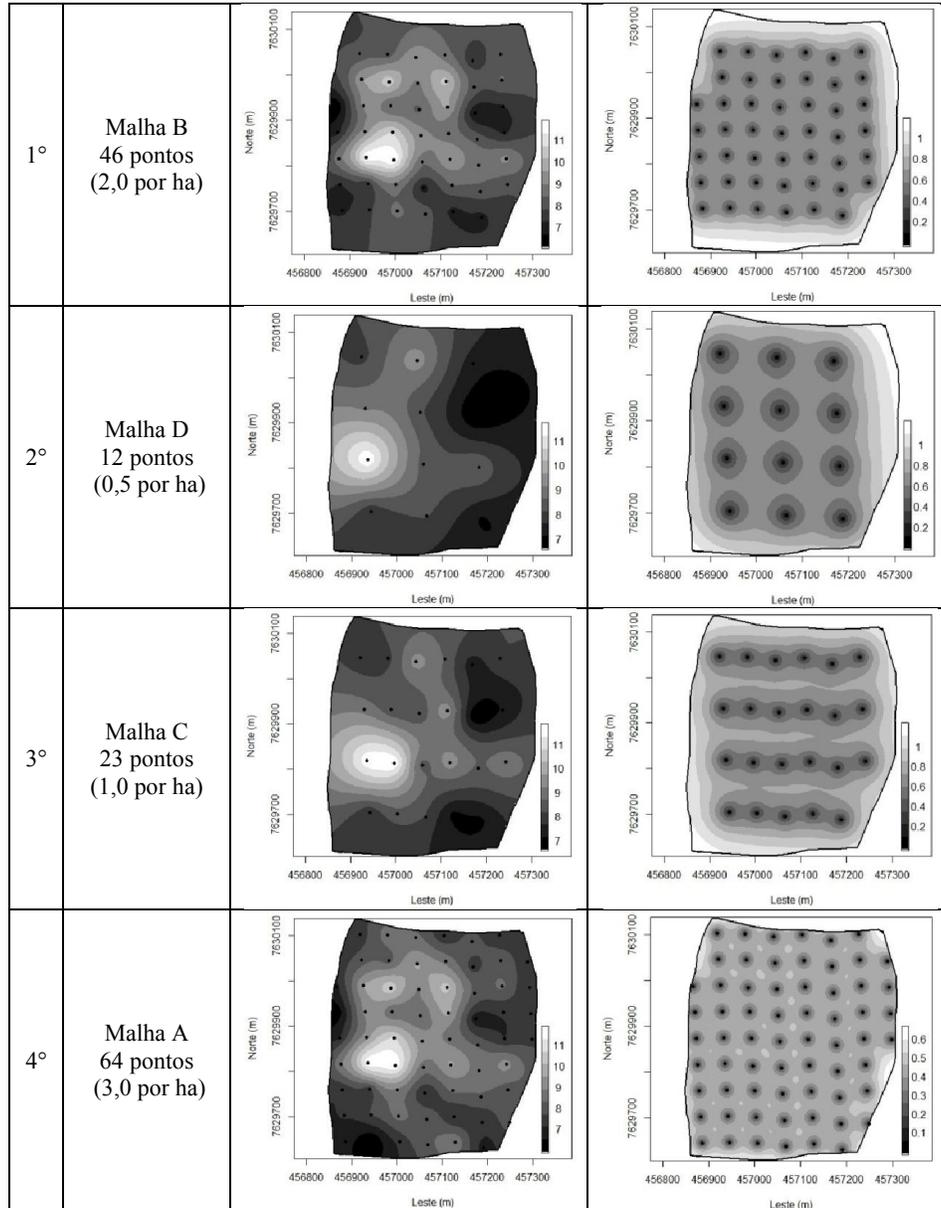


Figura 32 - Distribuição espacial da T (cmol.c.dm^{-3}) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

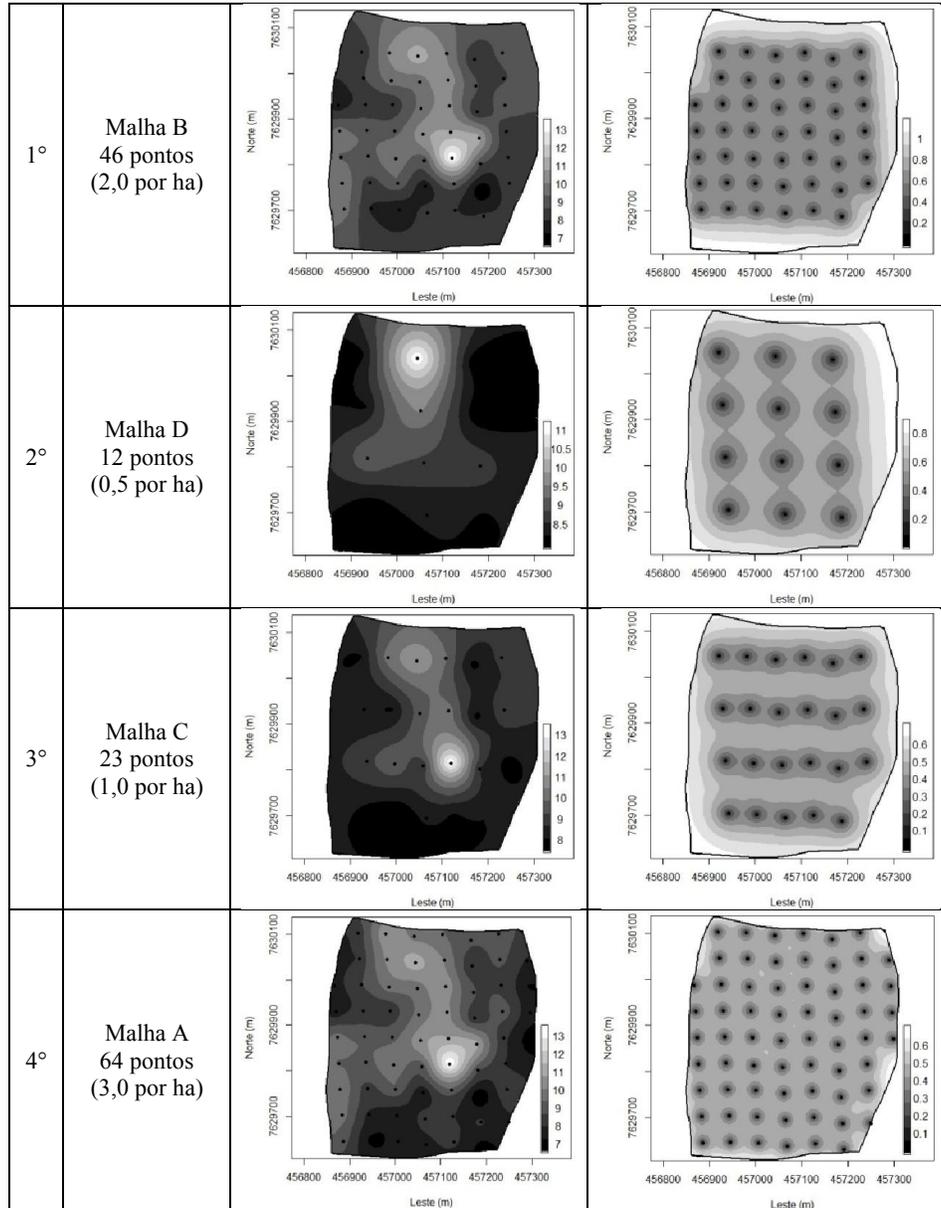


Figura 33 - Distribuição espacial da T em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

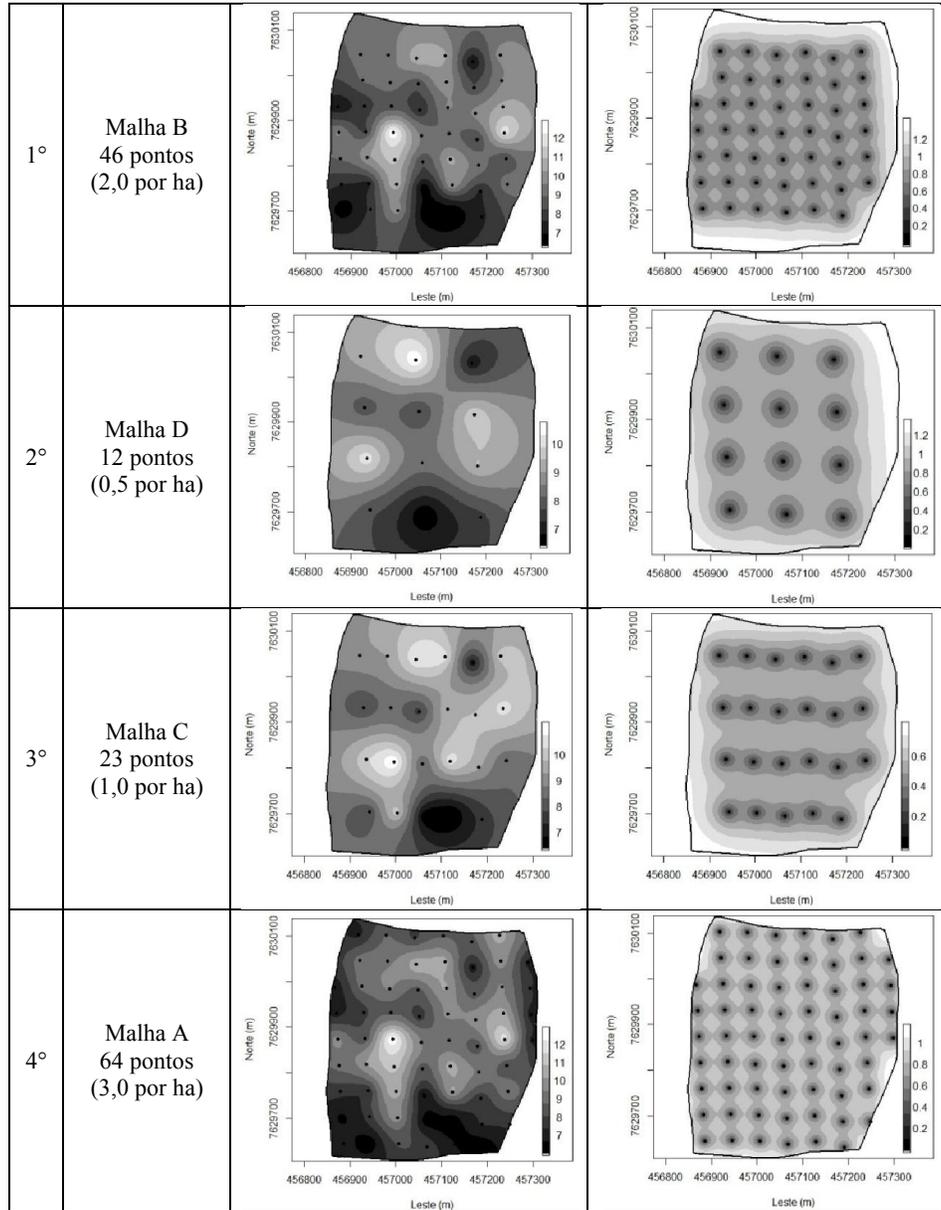


Figura 34 - Distribuição espacial da V(%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

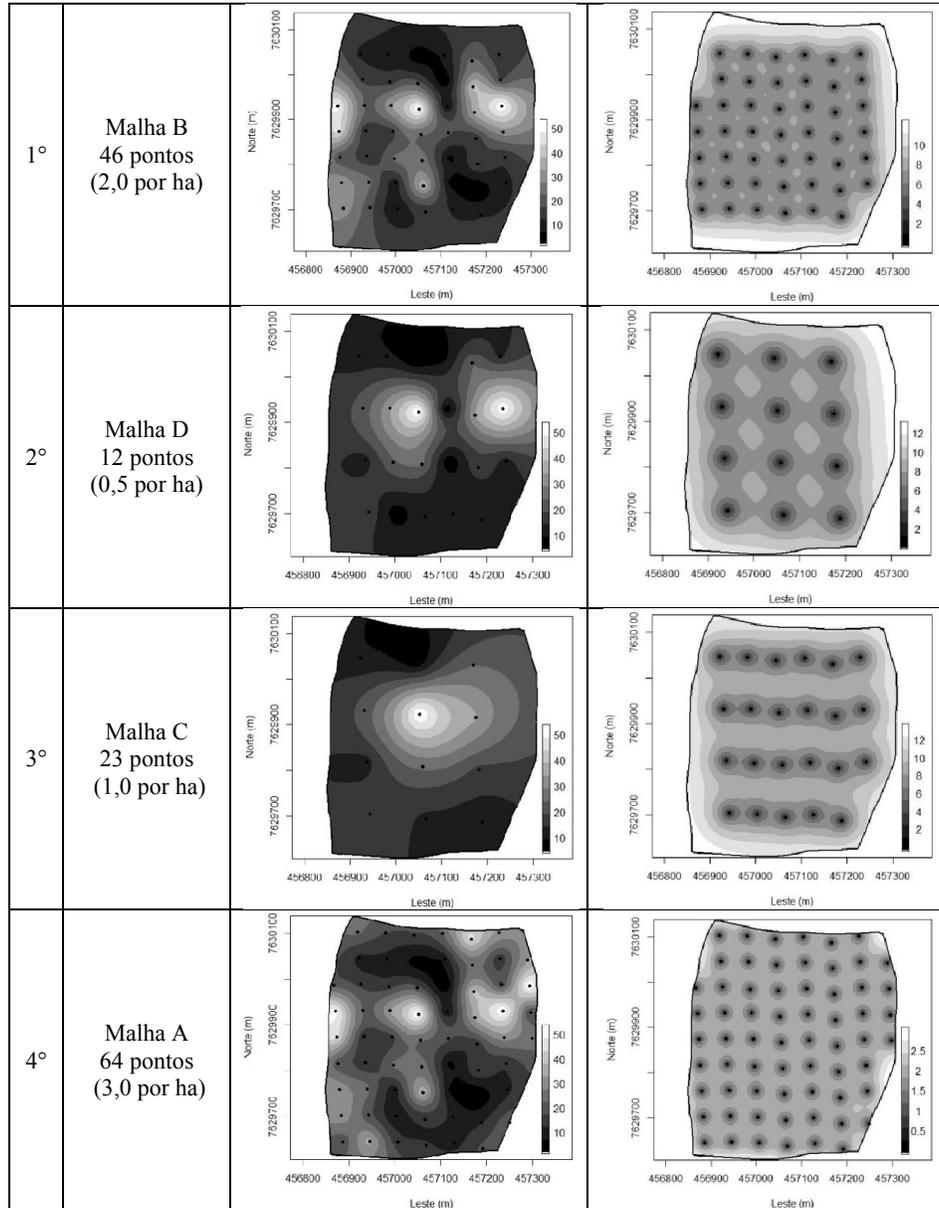


Figura 35 - Distribuição espacial da V(%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

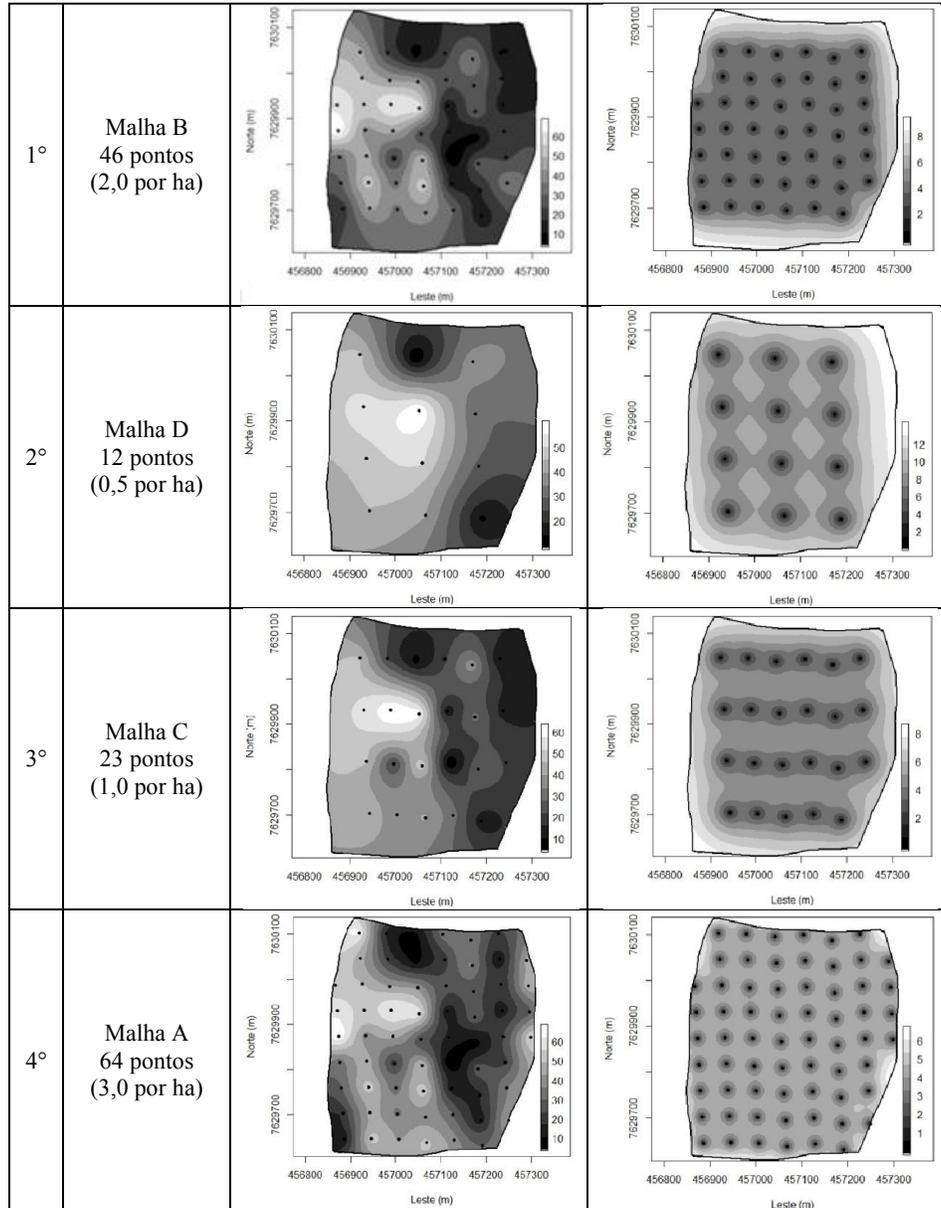


Figura 36 - Distribuição espacial da V(%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

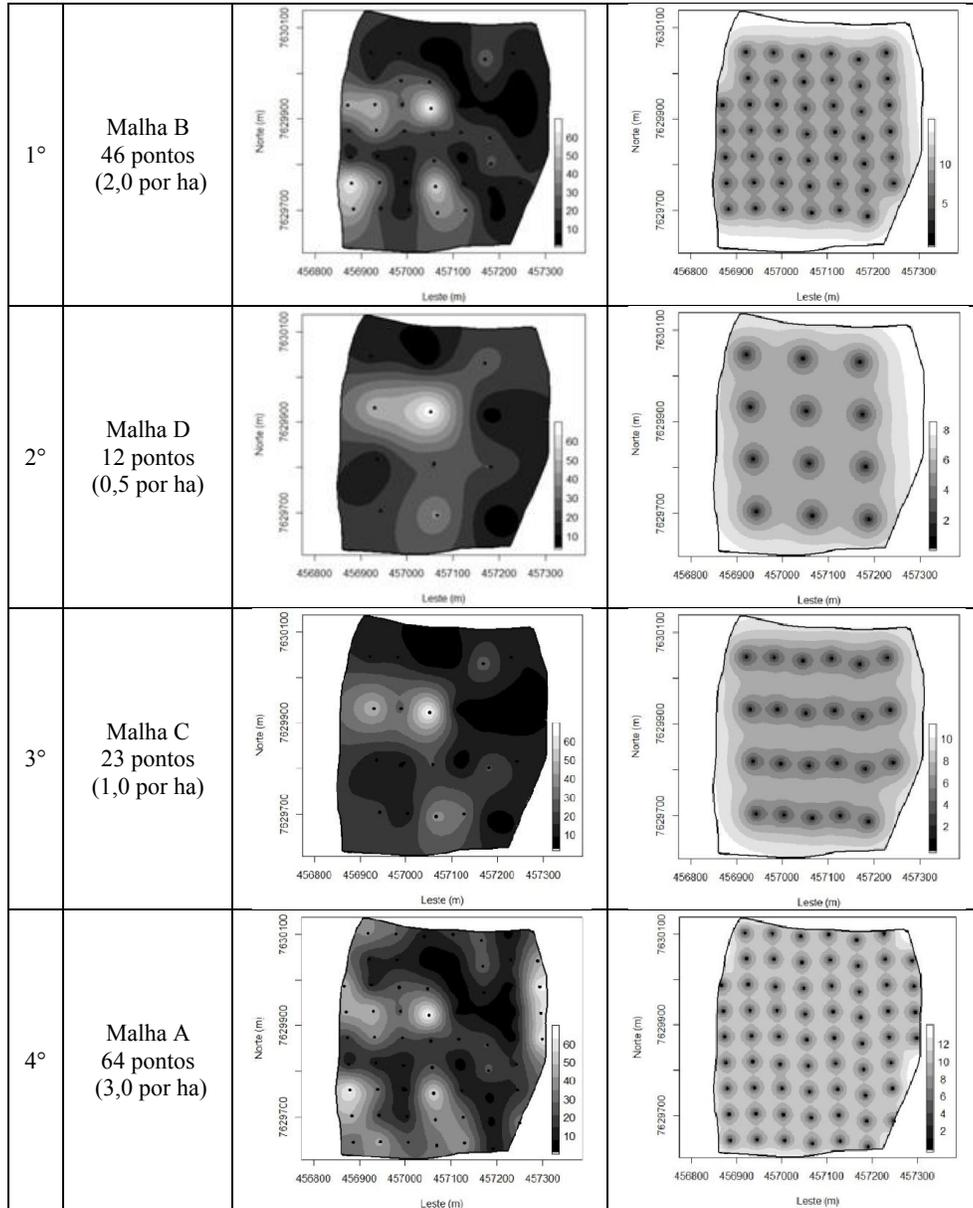


Figura 37 - Distribuição espacial da m(%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

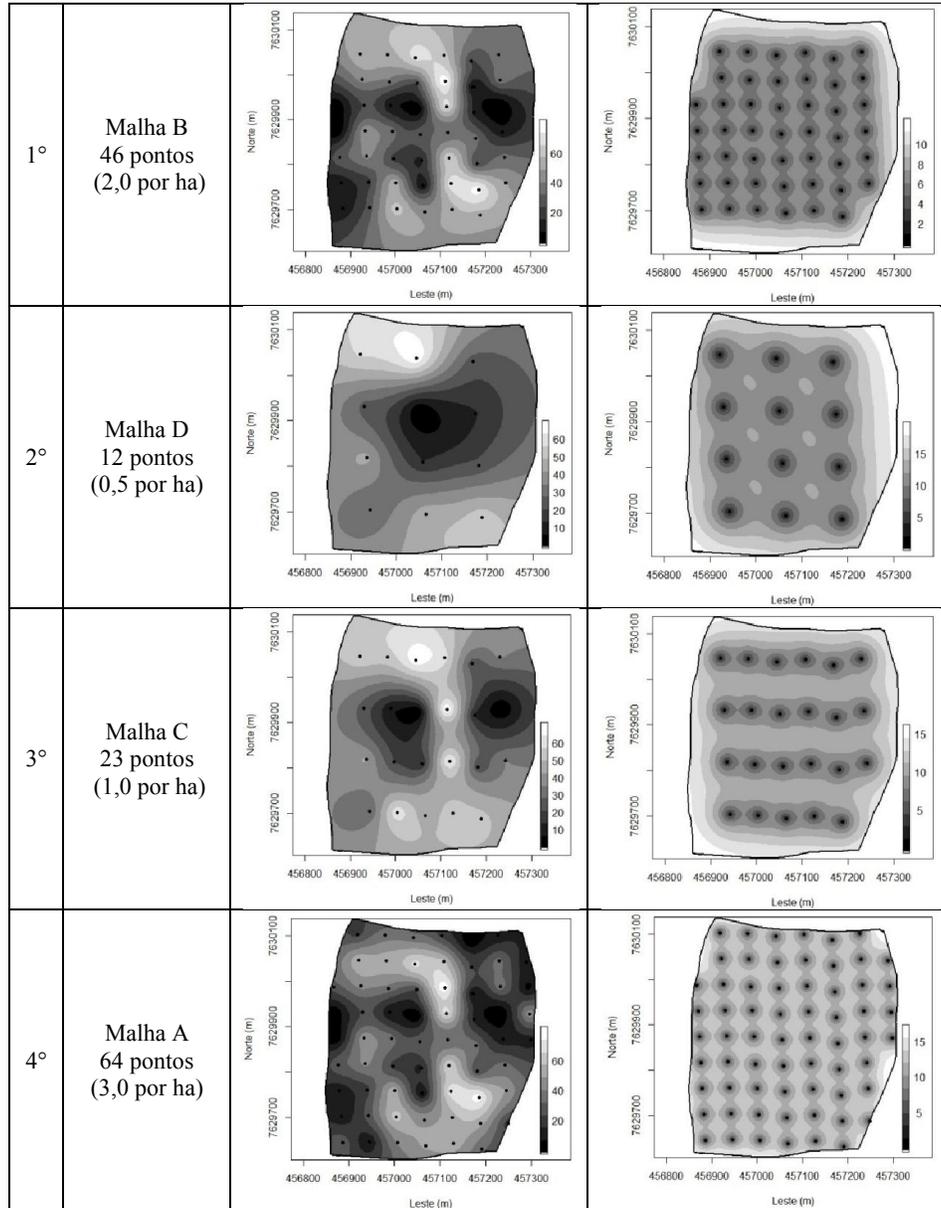


Figura 38 - Distribuição espacial da m(%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

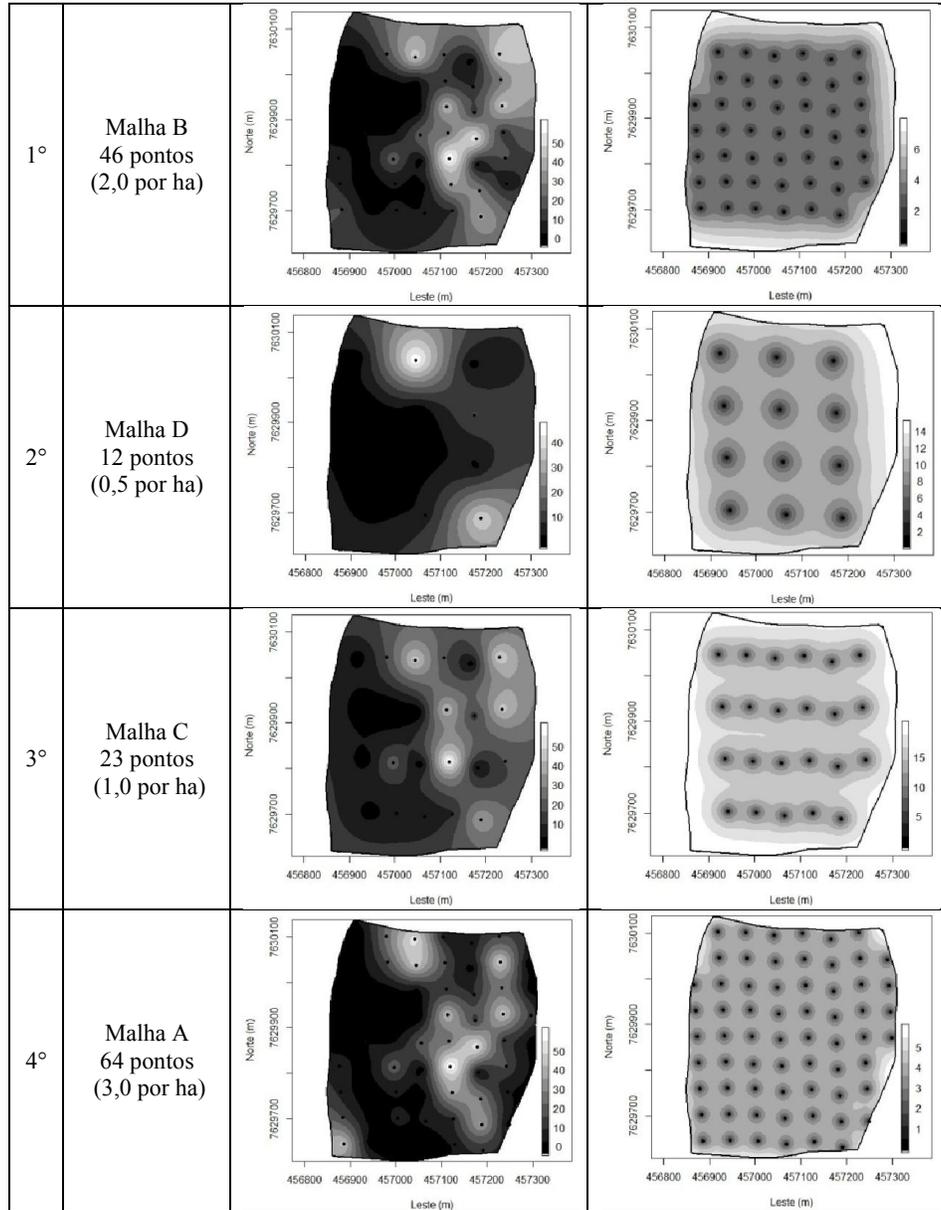


Figura 39 - Distribuição espacial da m(%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

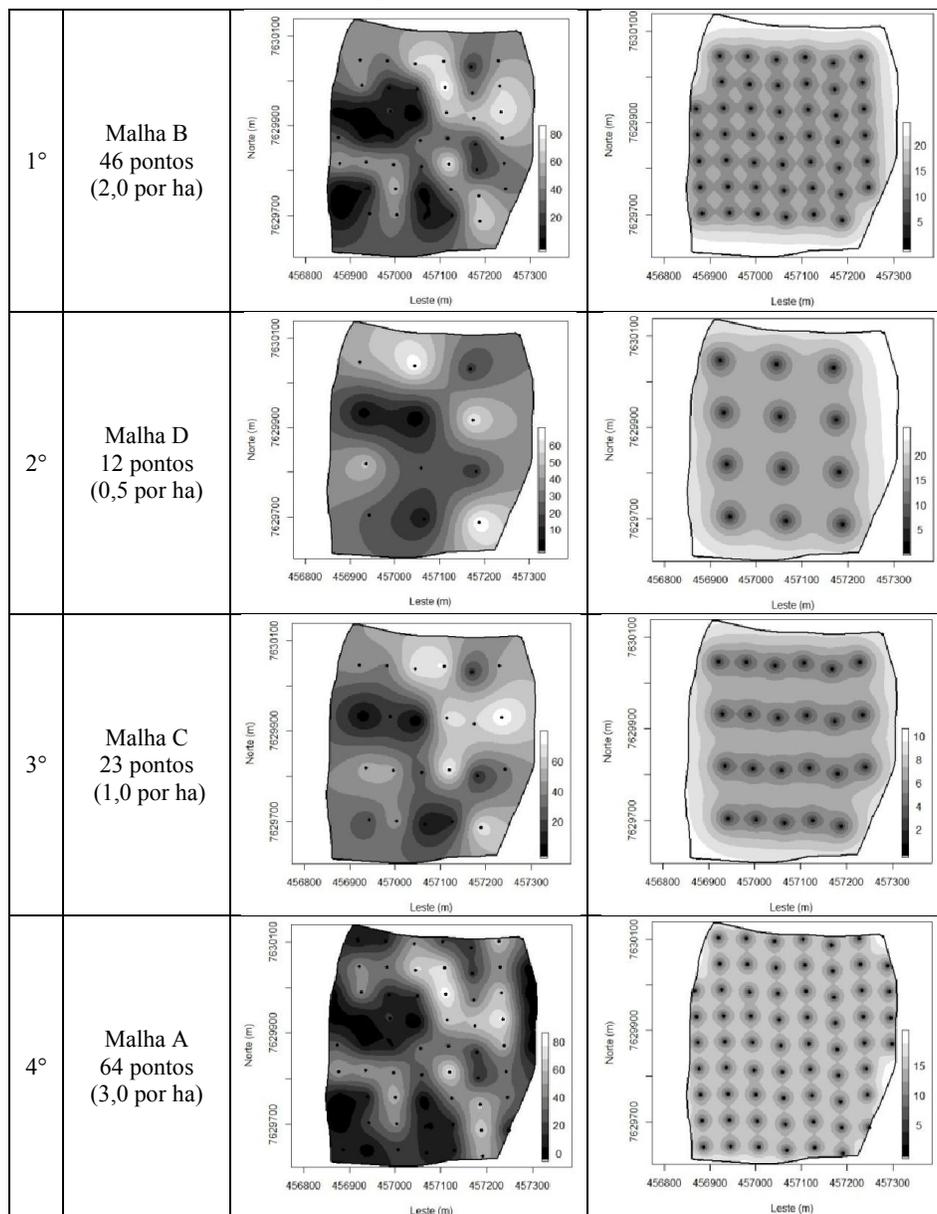


Figura 40 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

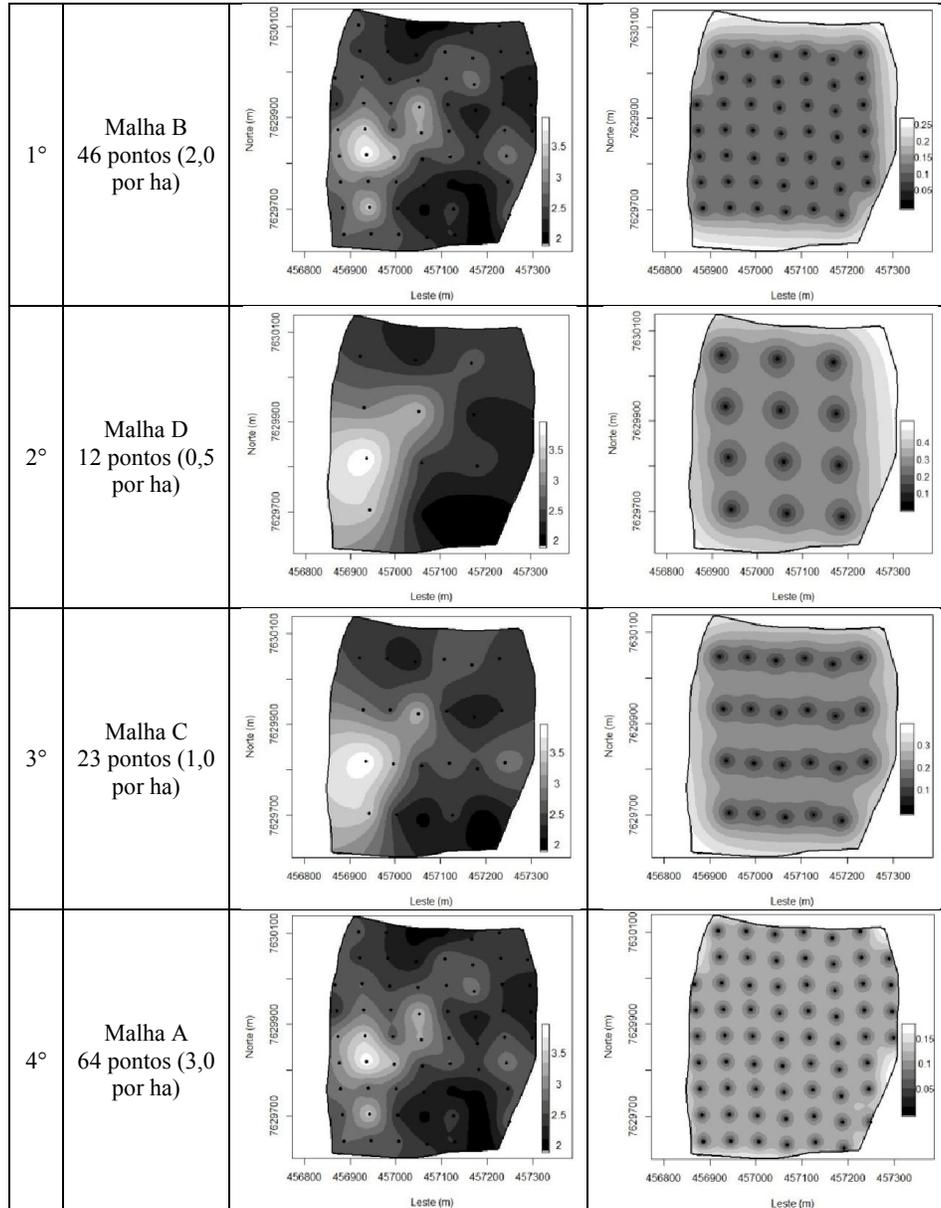


Figura 41 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

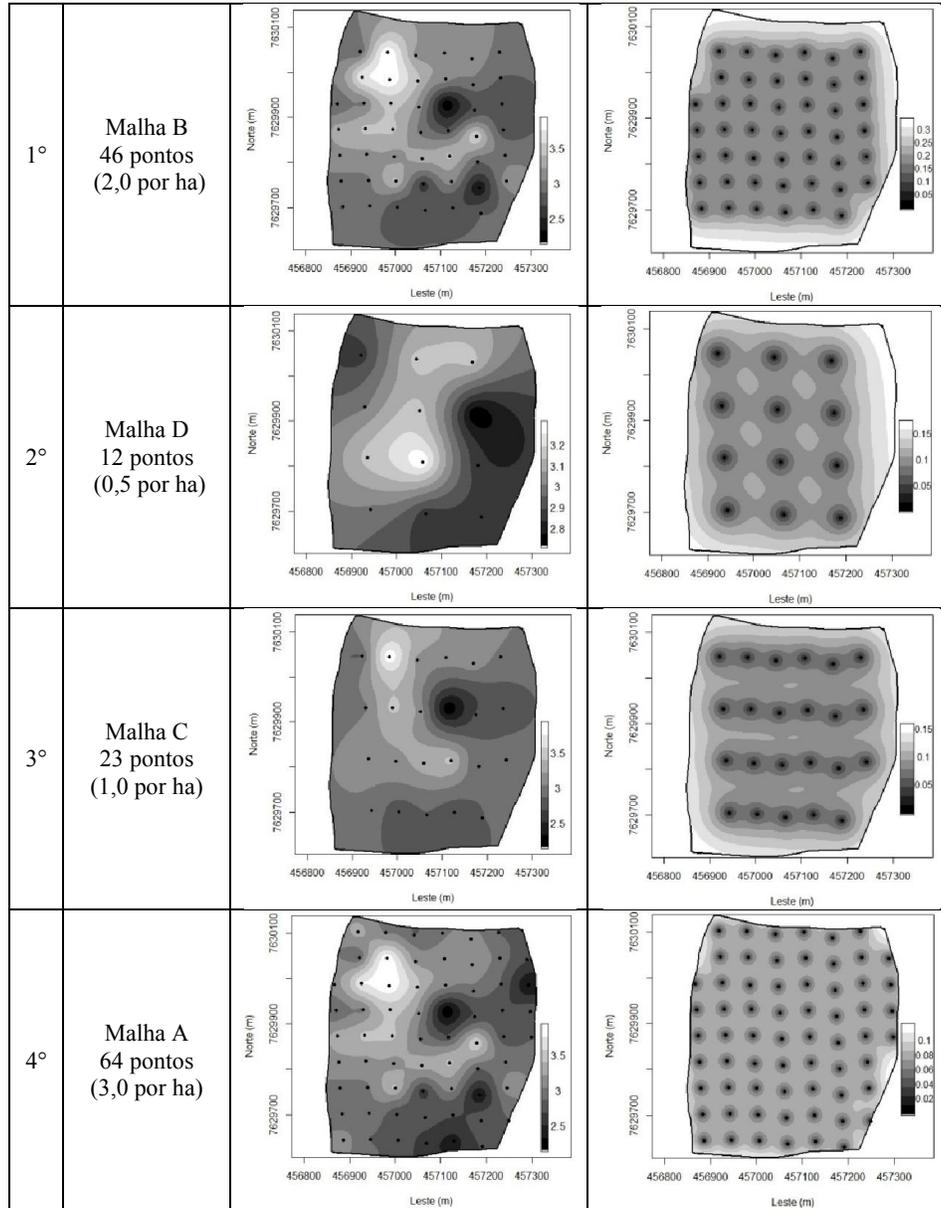


Figura 42 - Distribuição espacial da M.O. (dag/Kg) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

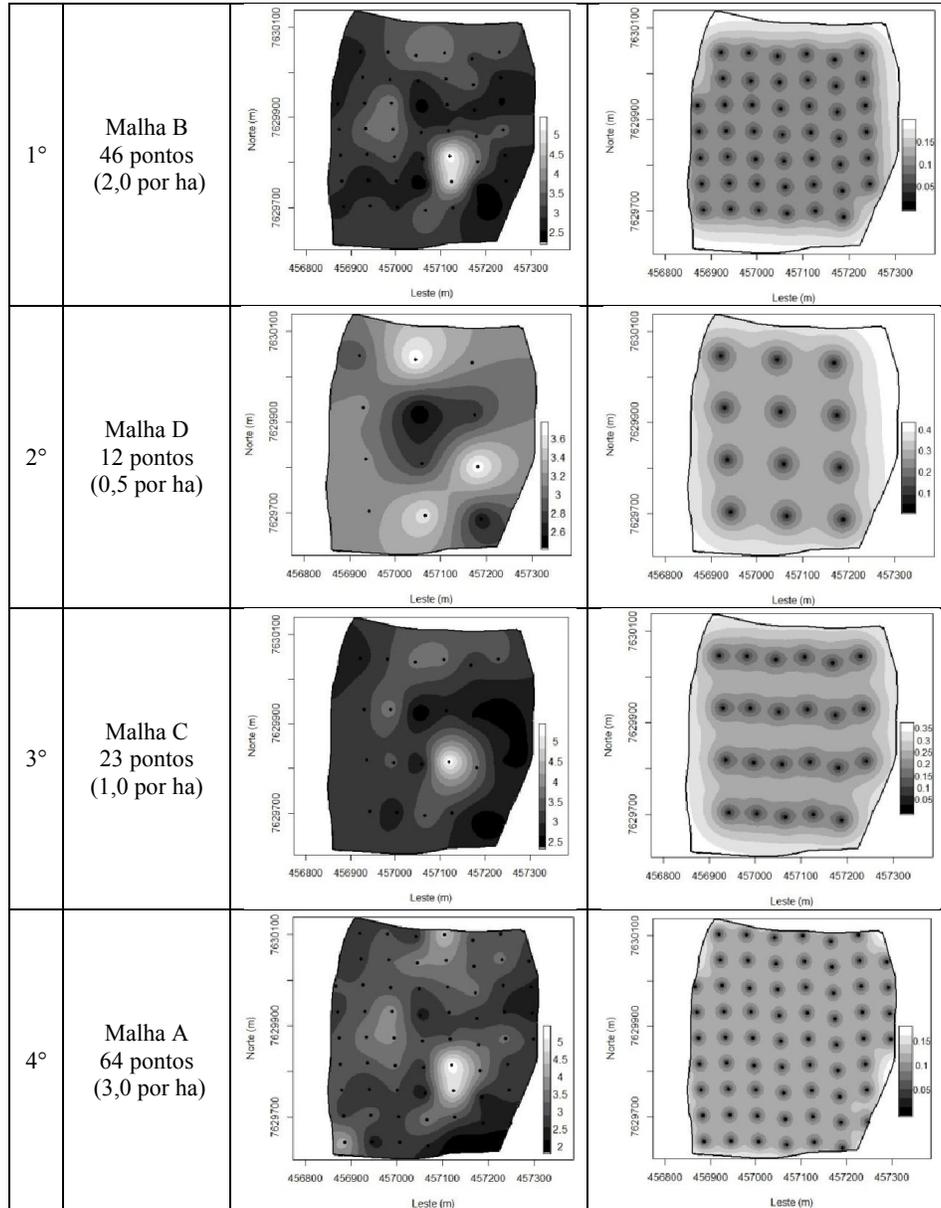


Figura 43 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

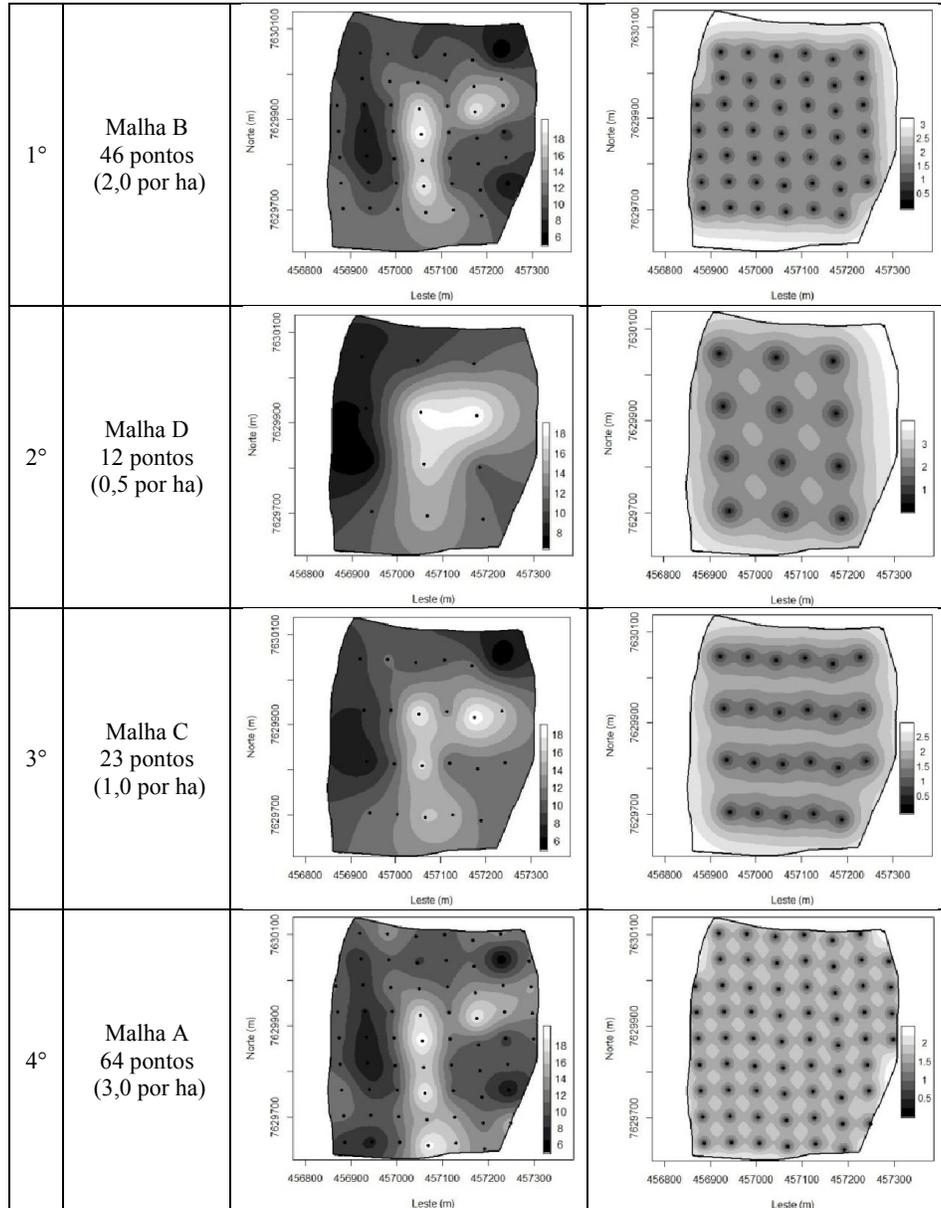


Figura 44 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

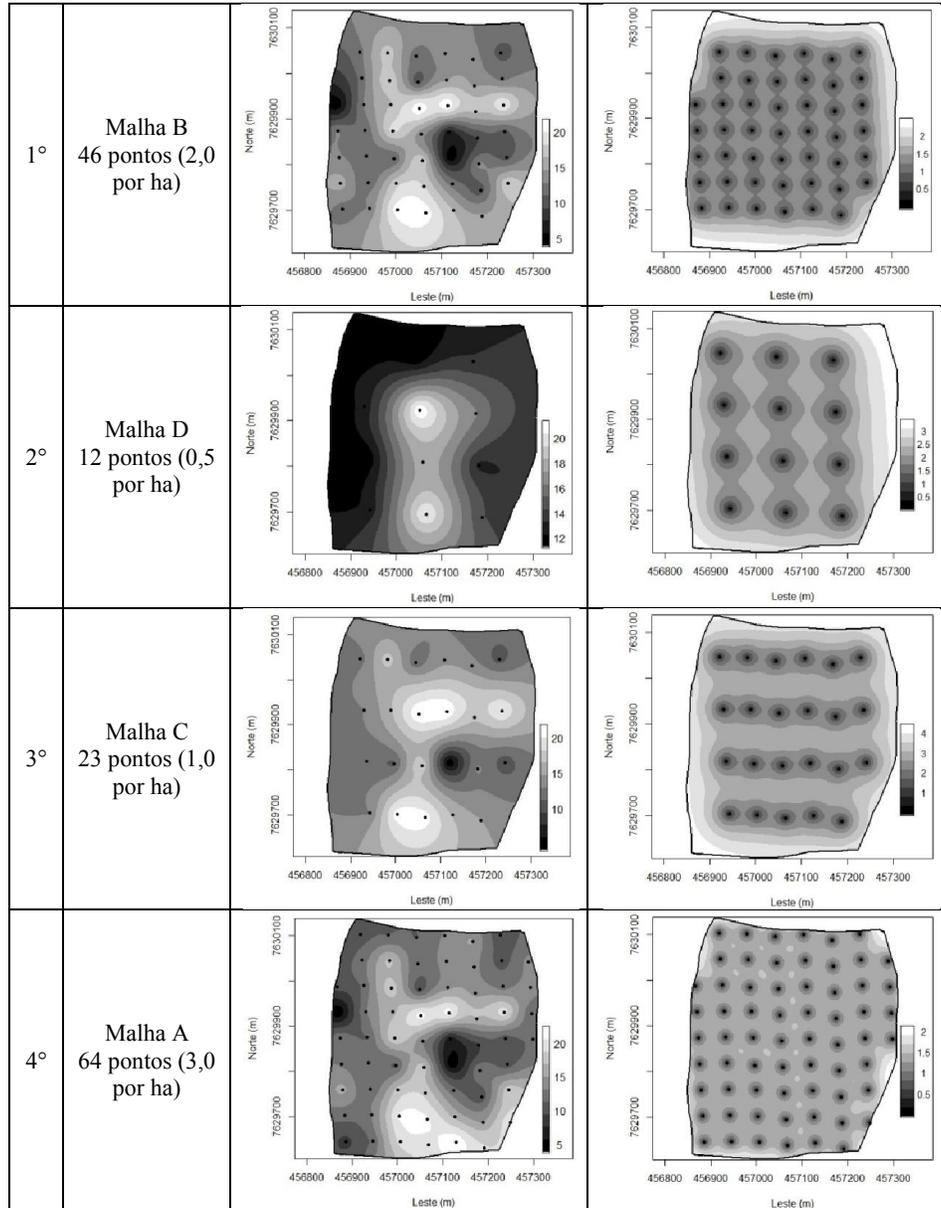


Figura 45 - Distribuição espacial do P-rem (mg/L) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

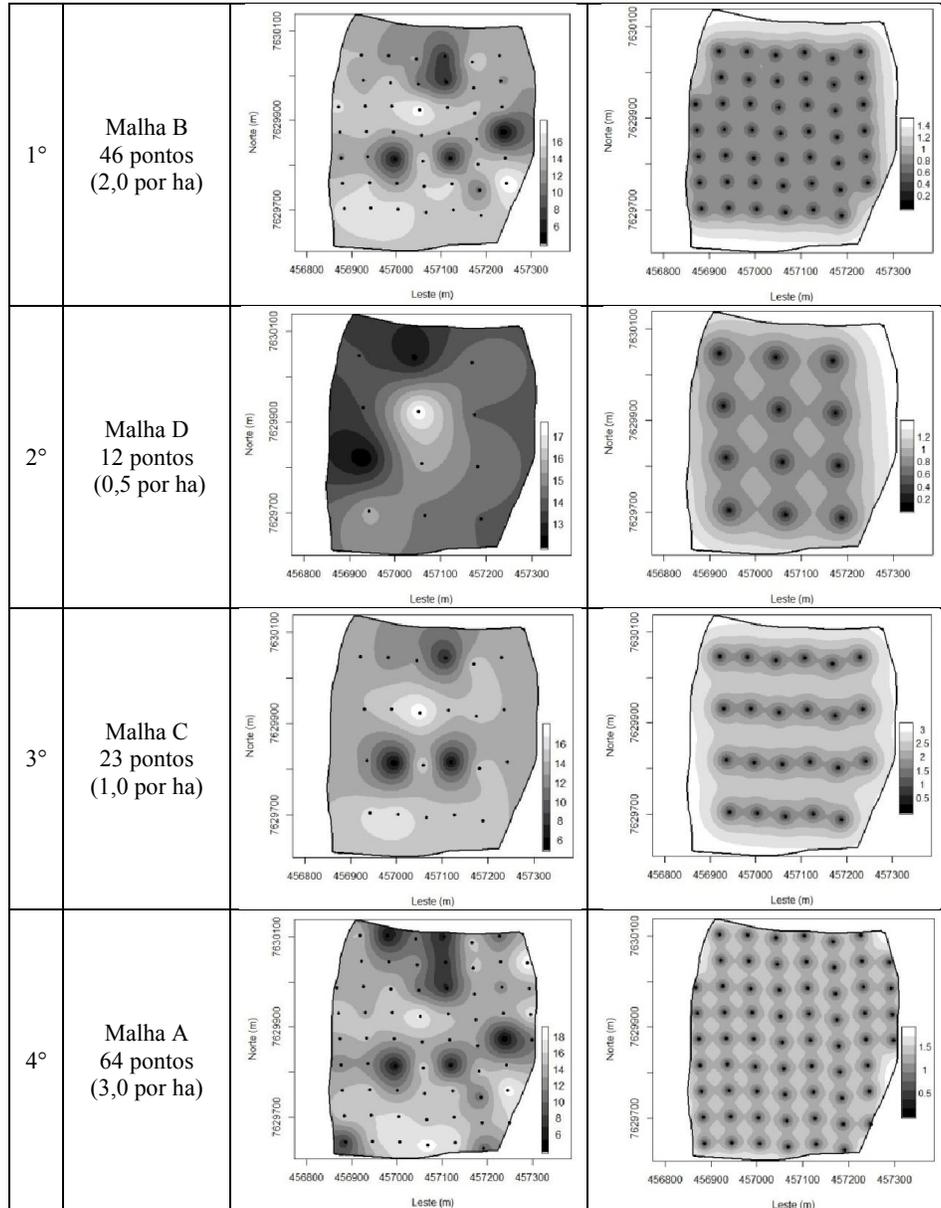


Figura 46 - Distribuição espacial do N (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

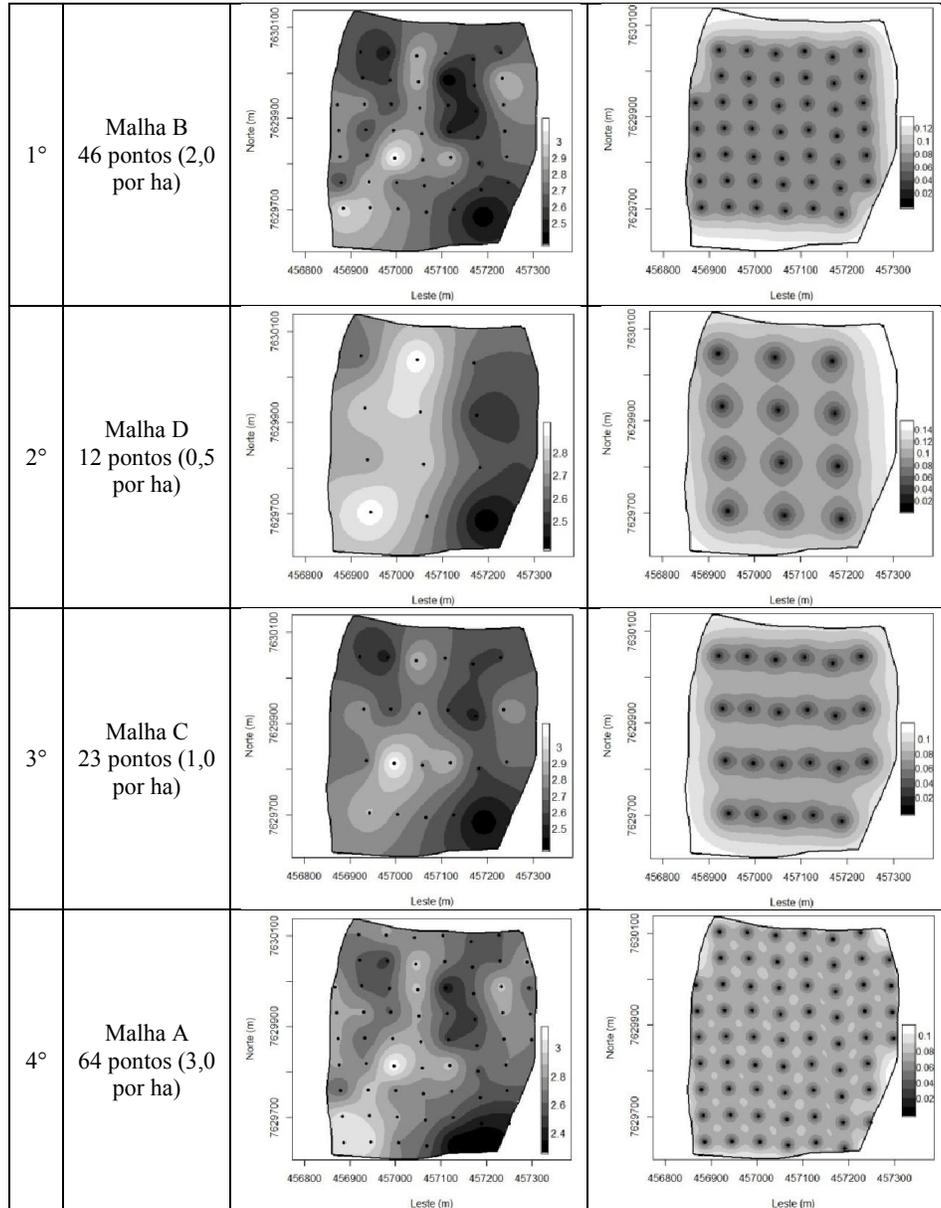


Figura 47 - Distribuição espacial do N (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

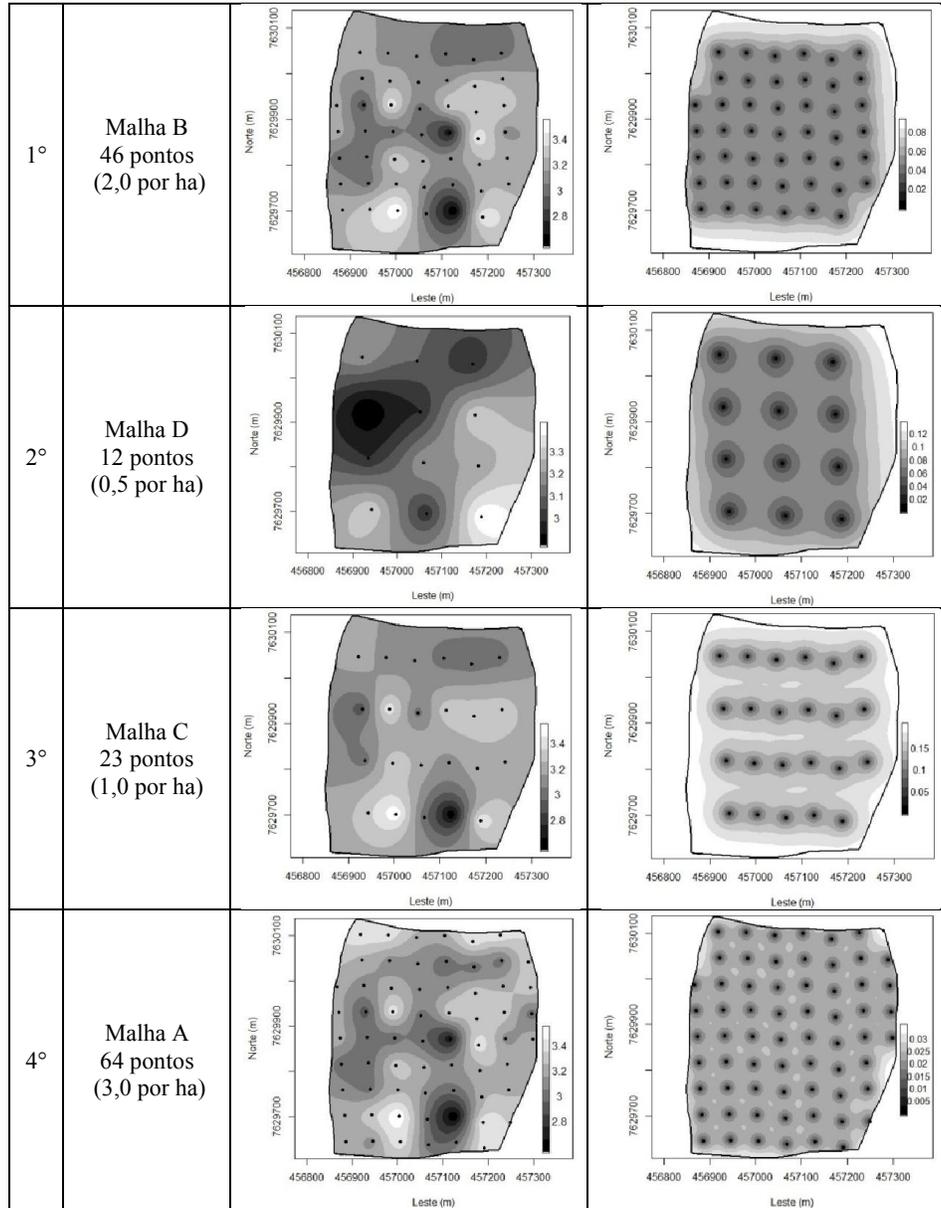


Figura 48 - Distribuição espacial do N (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

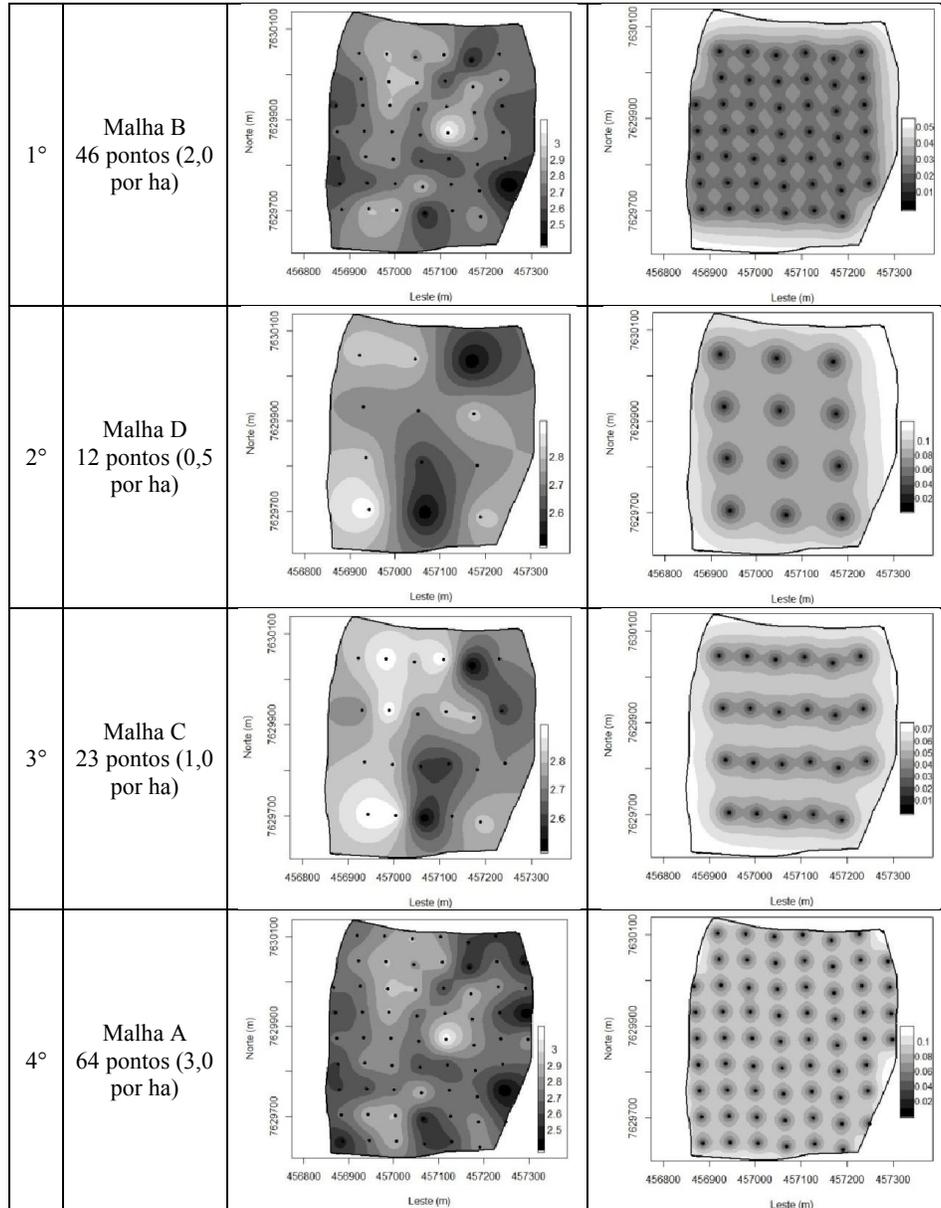


Figura 49 - Distribuição espacial do P (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

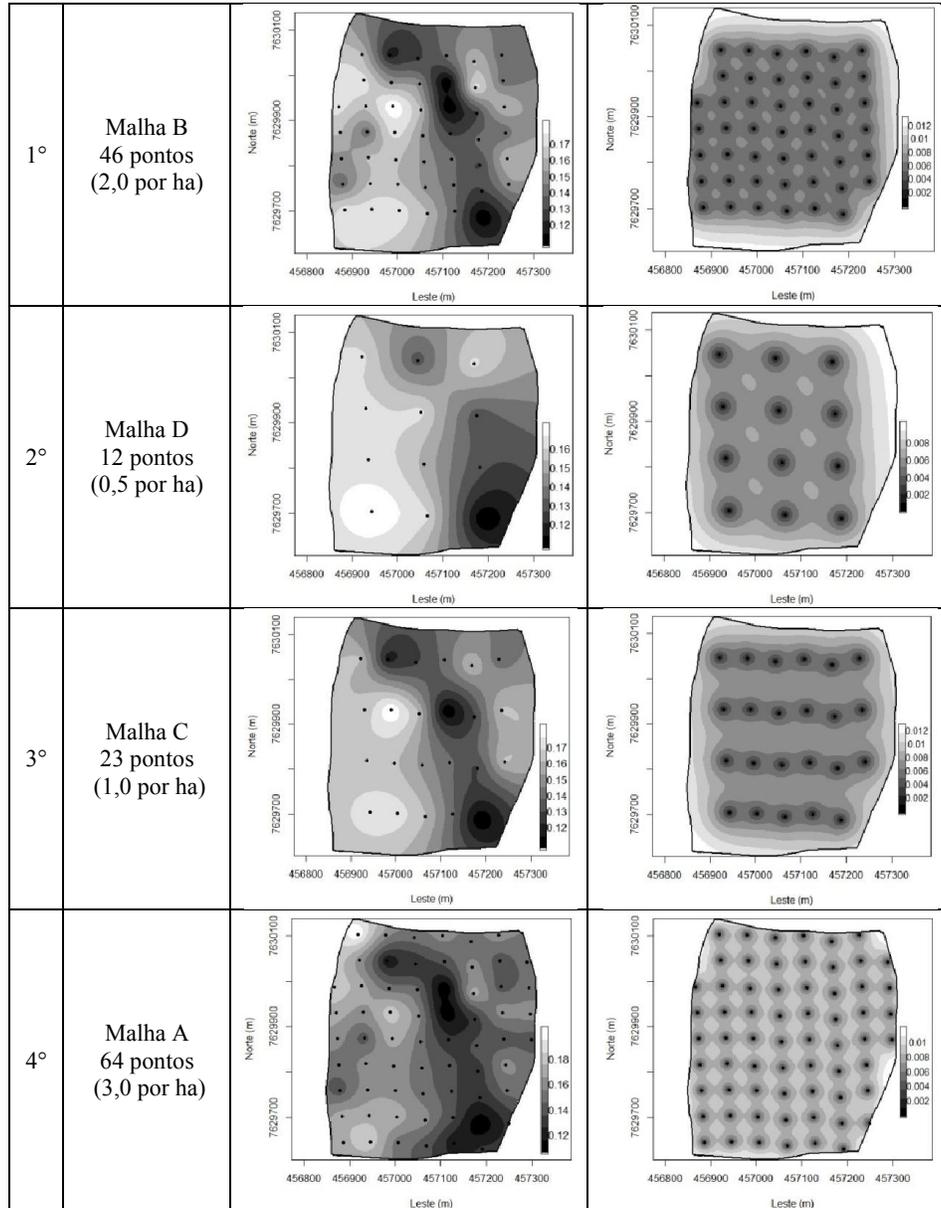


Figura 50 - Distribuição espacial do P (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

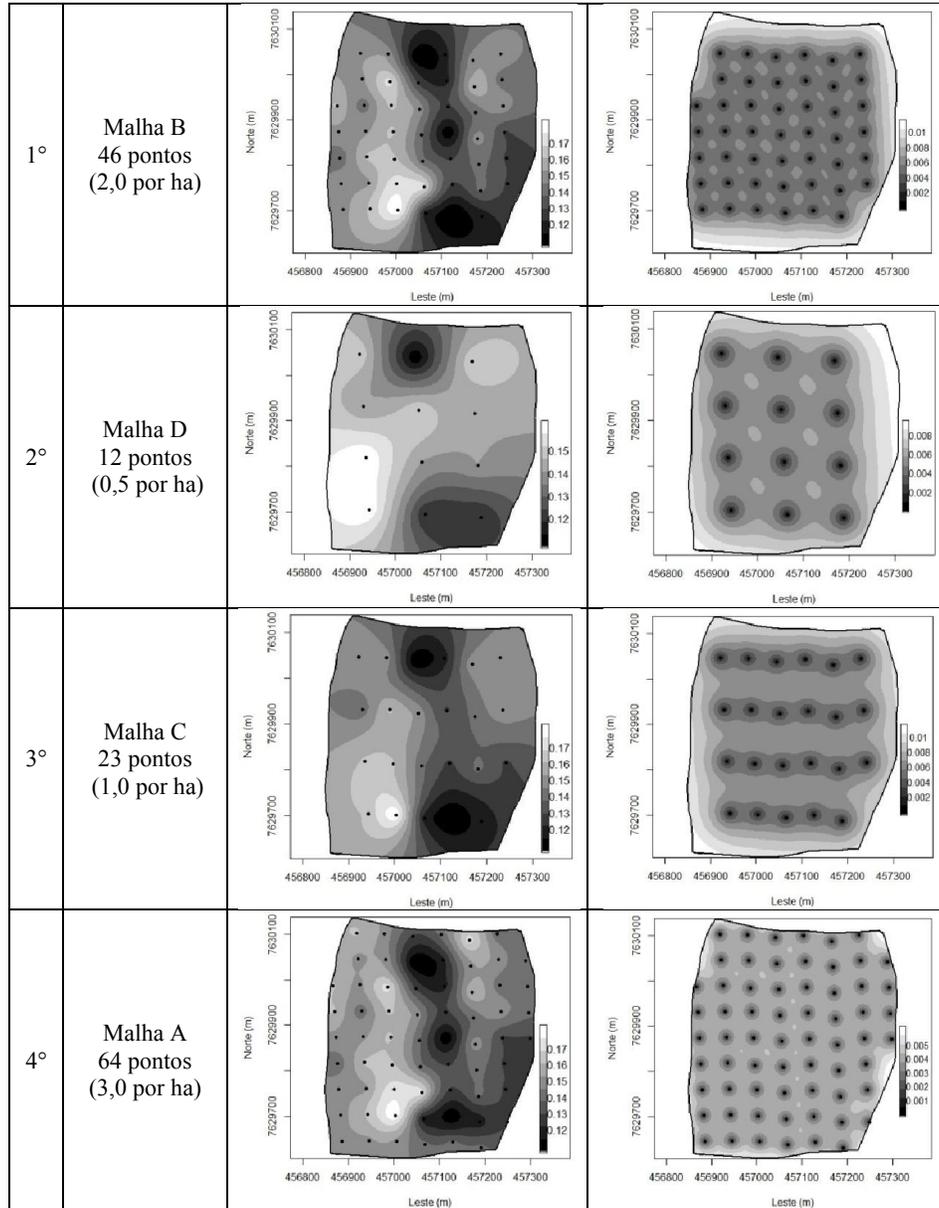


Figura 51 - Distribuição espacial do P (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

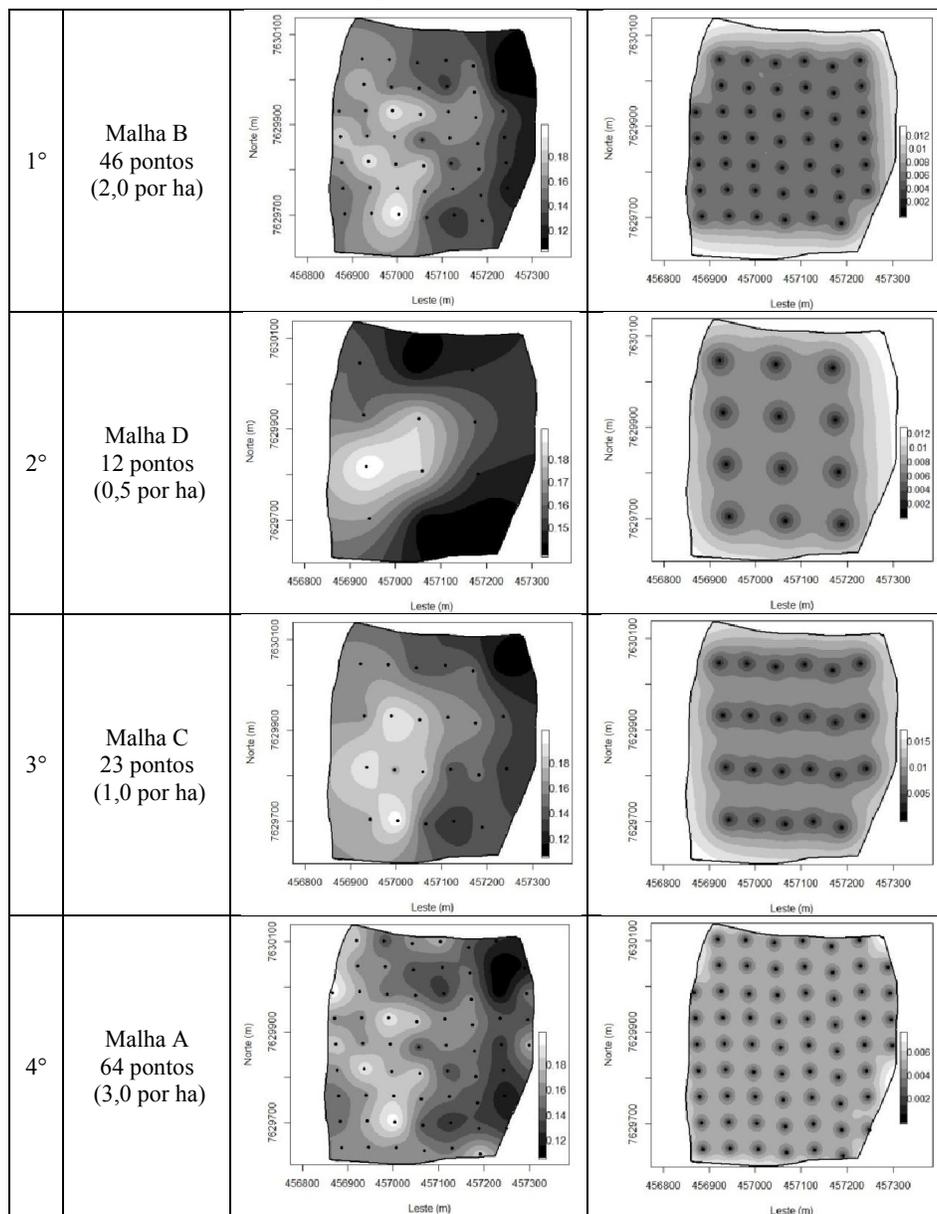


Figura 52 - Distribuição espacial do K (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

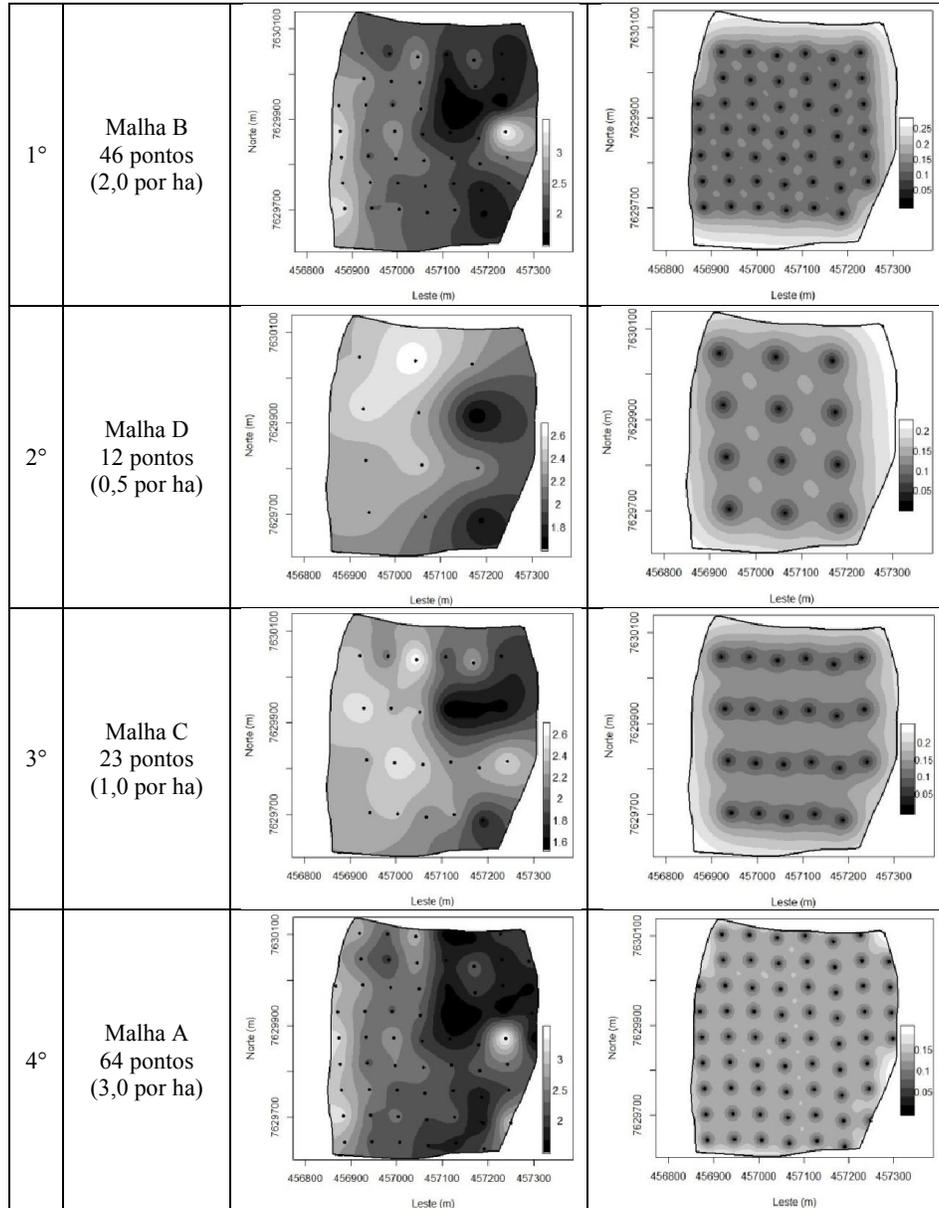


Figura 53 - Distribuição espacial do K (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

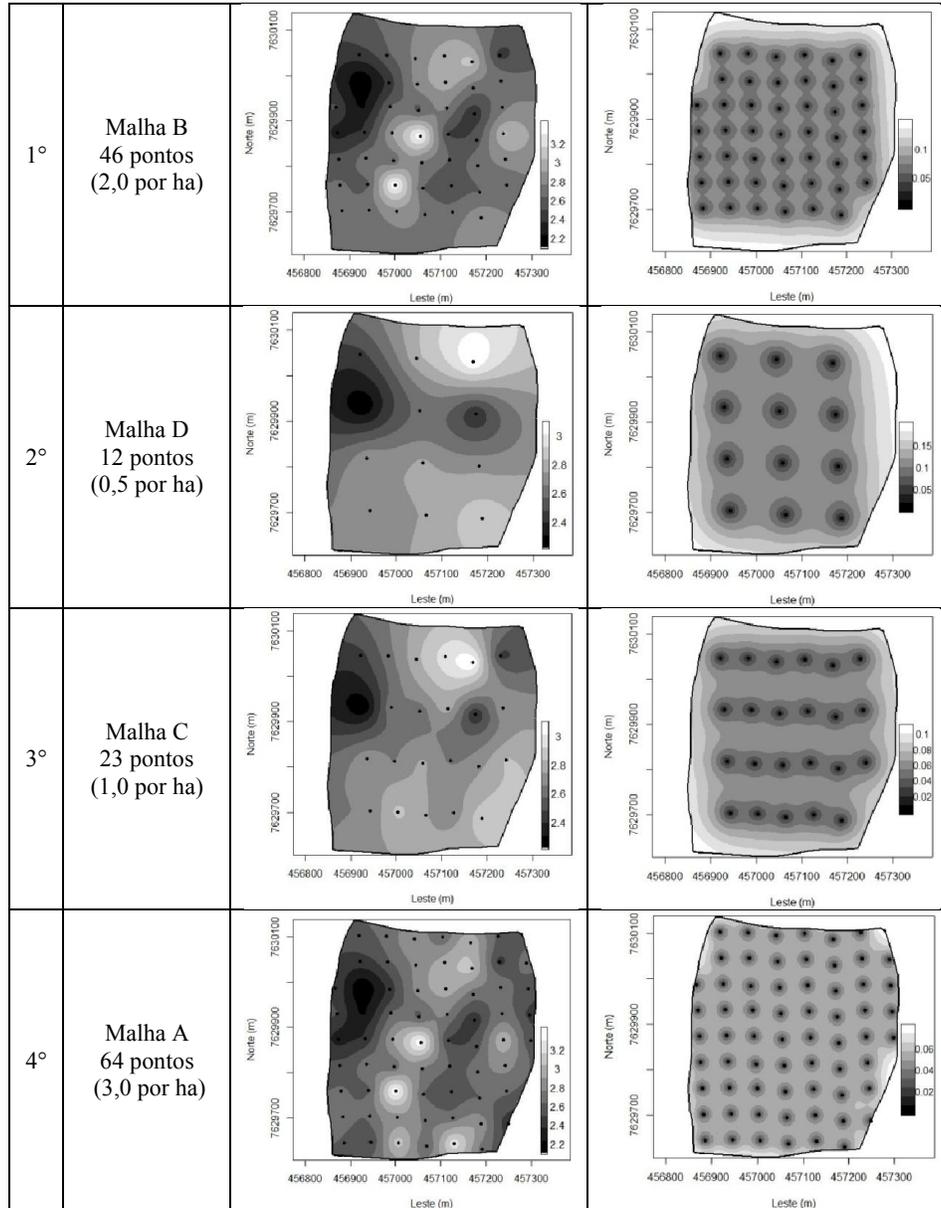


Figura 54 - Distribuição espacial do K (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

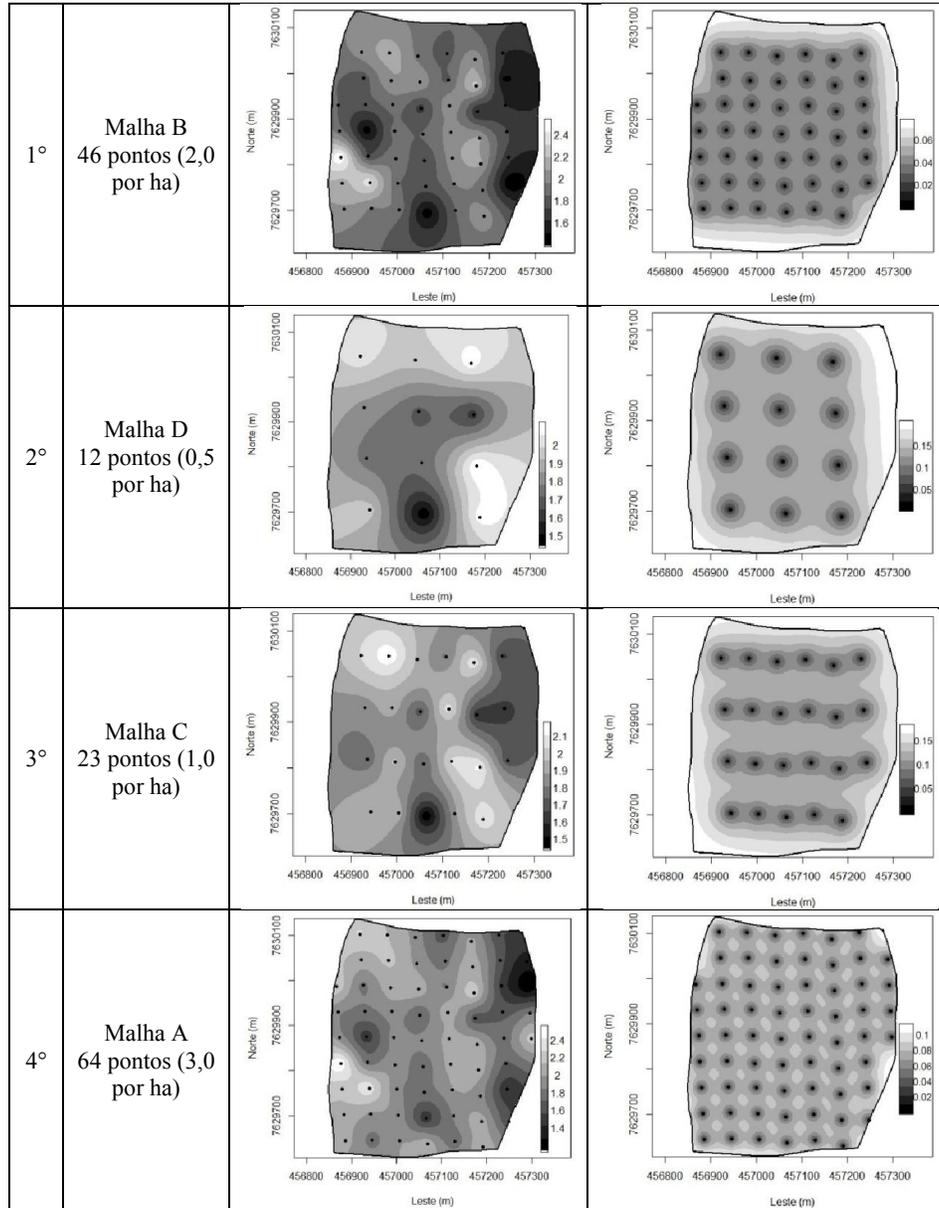


Figura 55 - Distribuição espacial do Ca (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

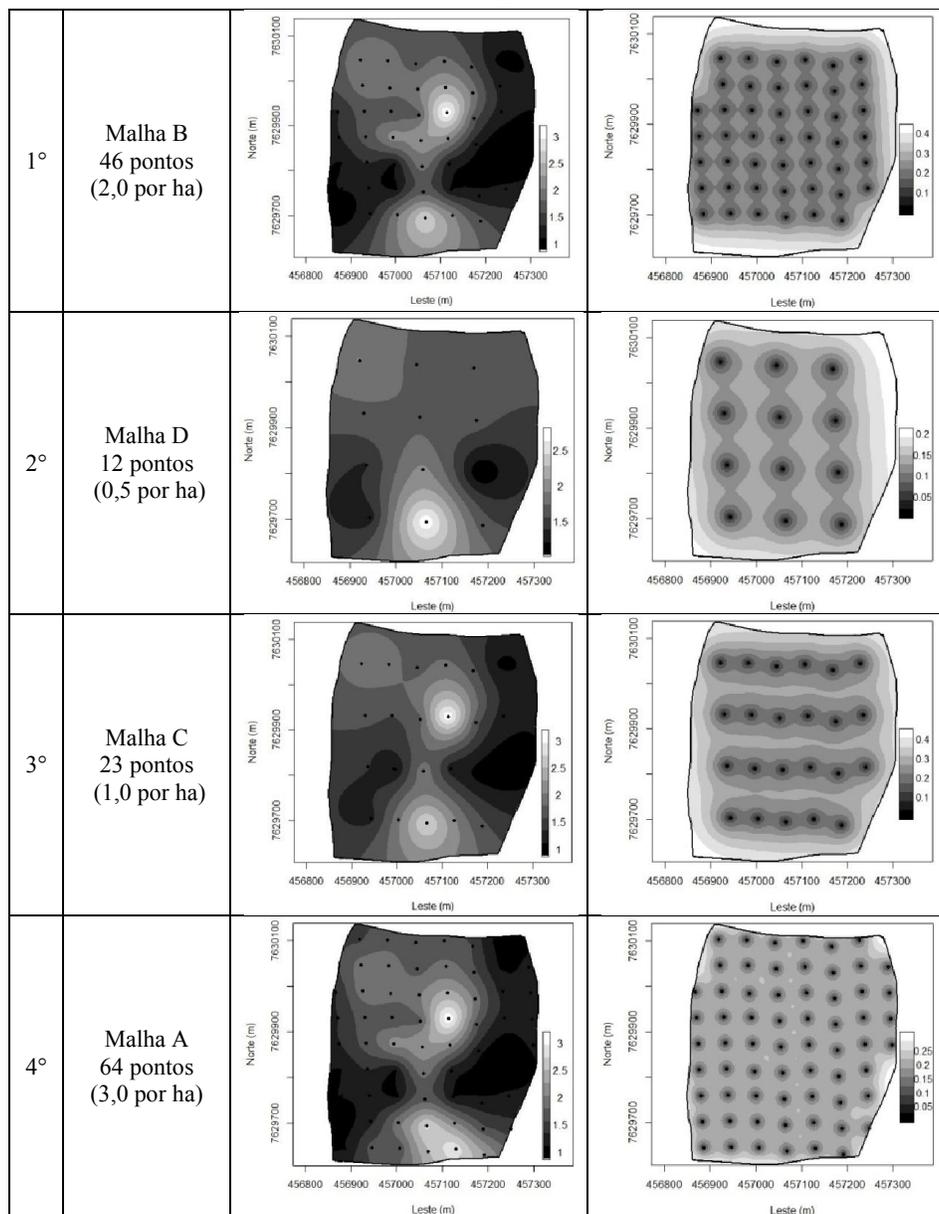


Figura 56 - Distribuição espacial do Ca (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

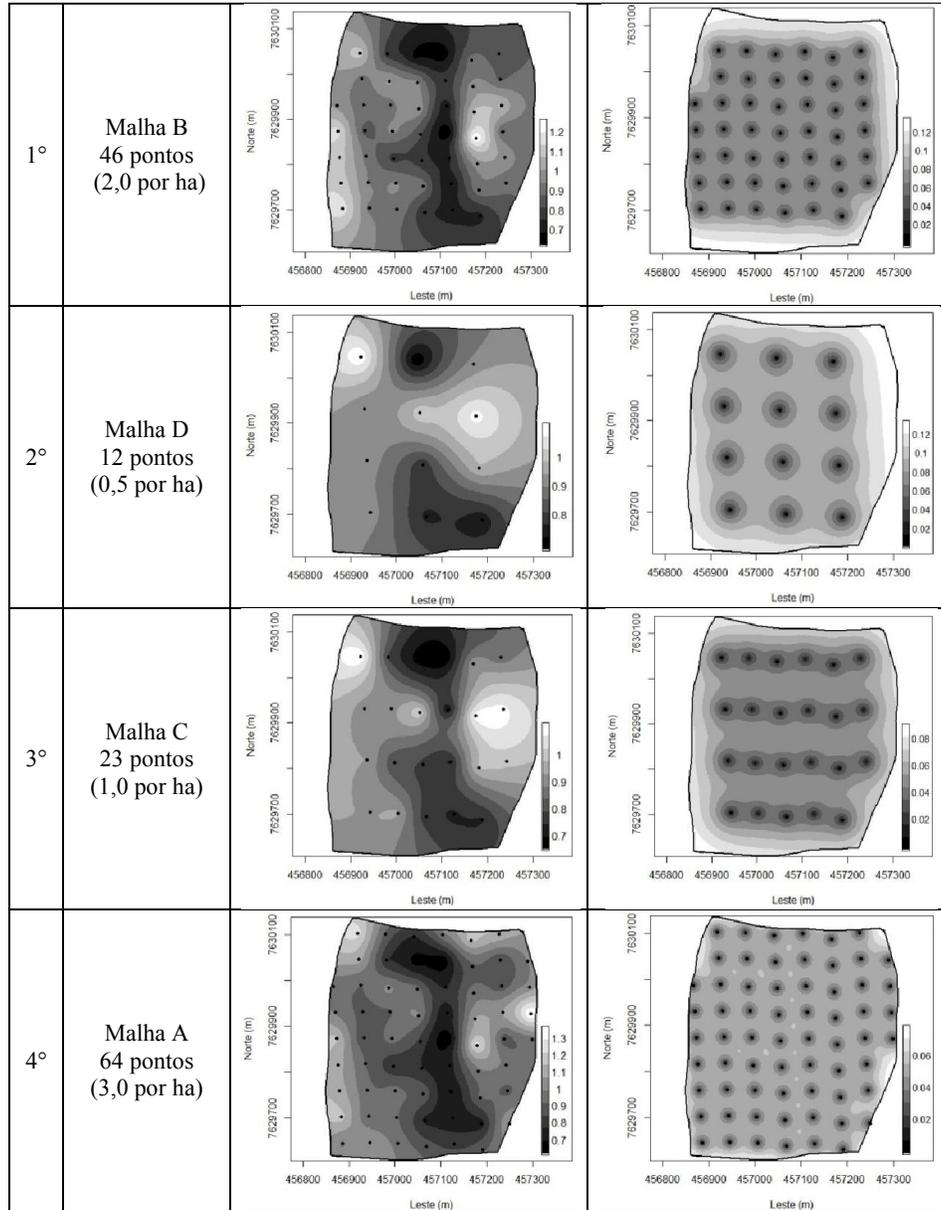


Figura 57 - Distribuição espacial do Ca (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

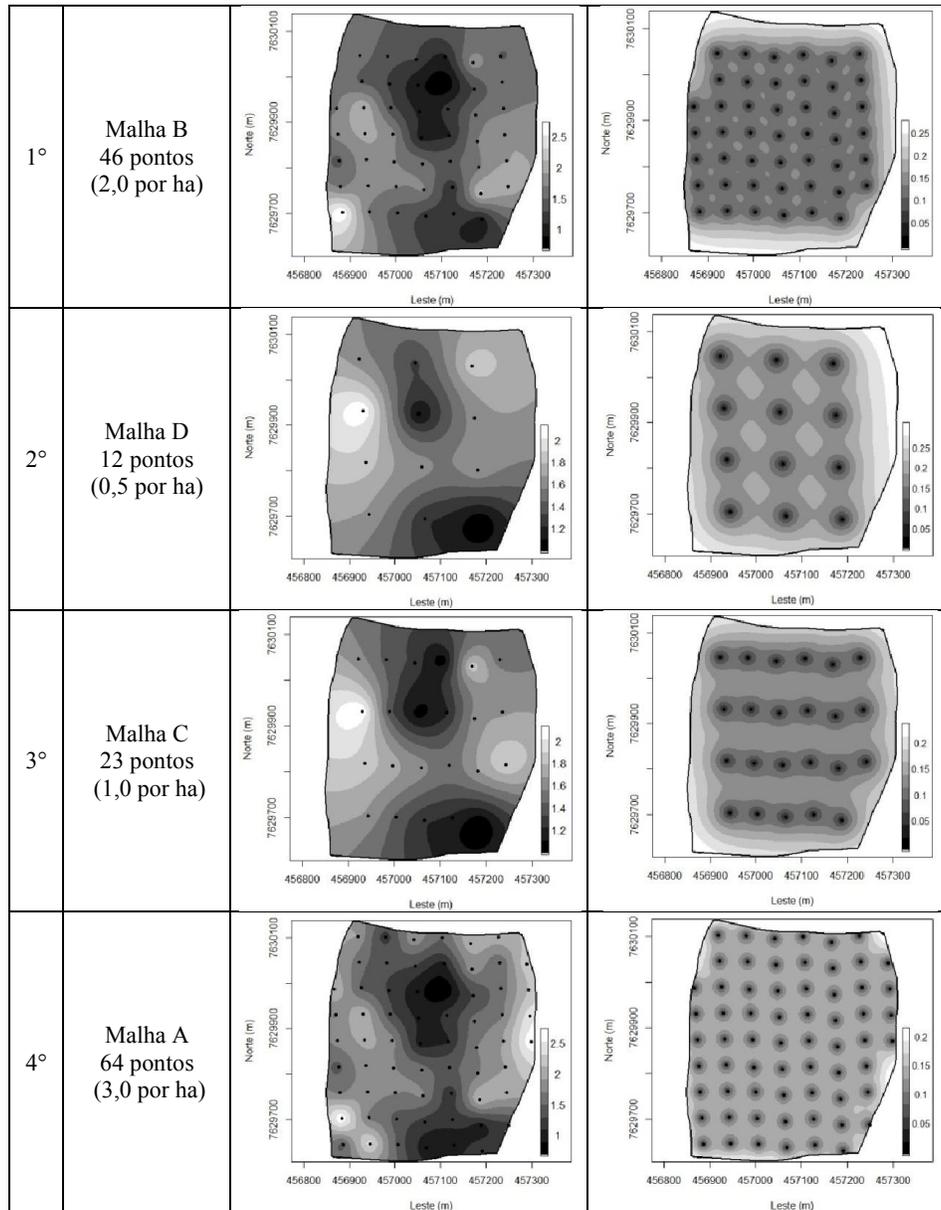


Figura 58 - Distribuição espacial do Mg (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

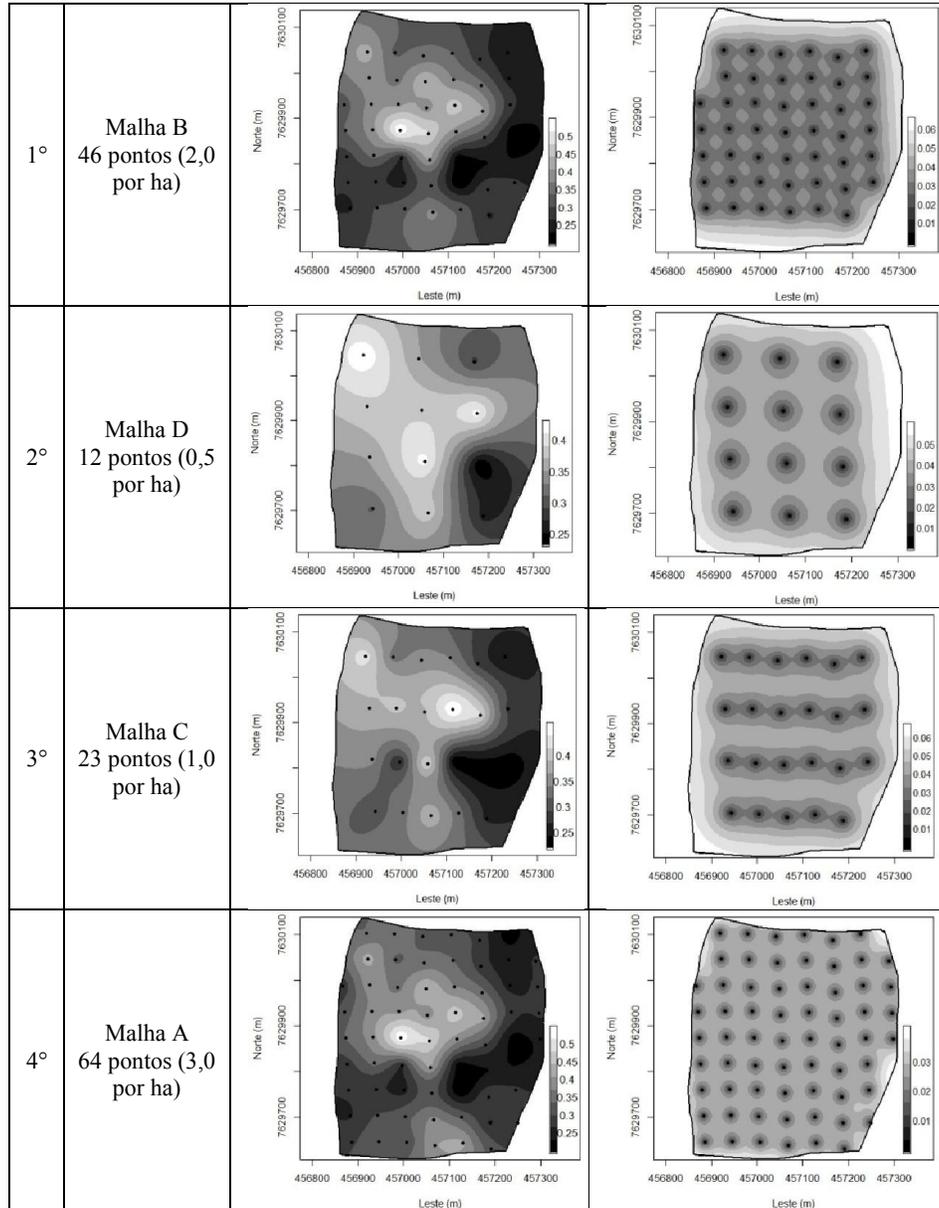


Figura 59 - Distribuição espacial do Mg (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

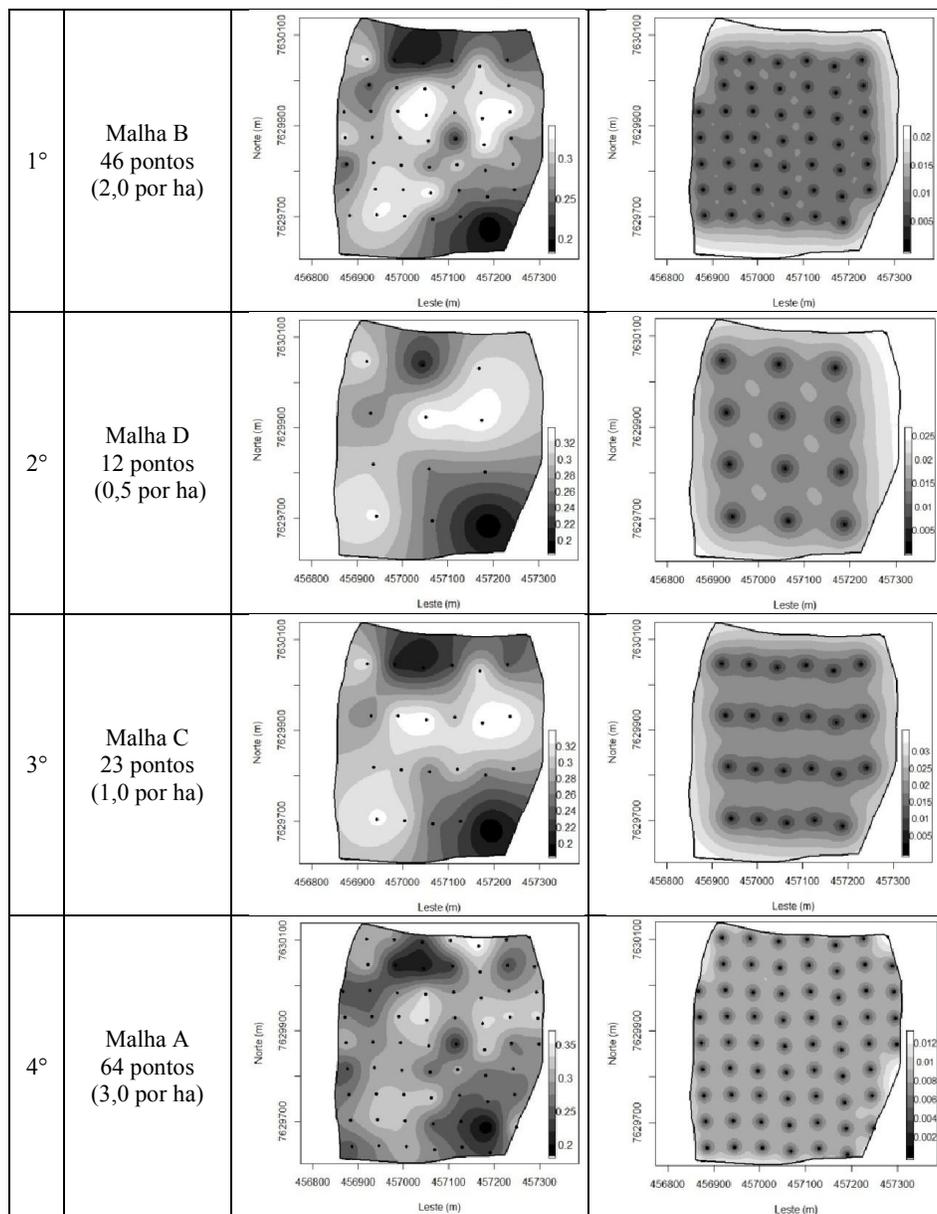


Figura 60 - Distribuição espacial do Mg (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

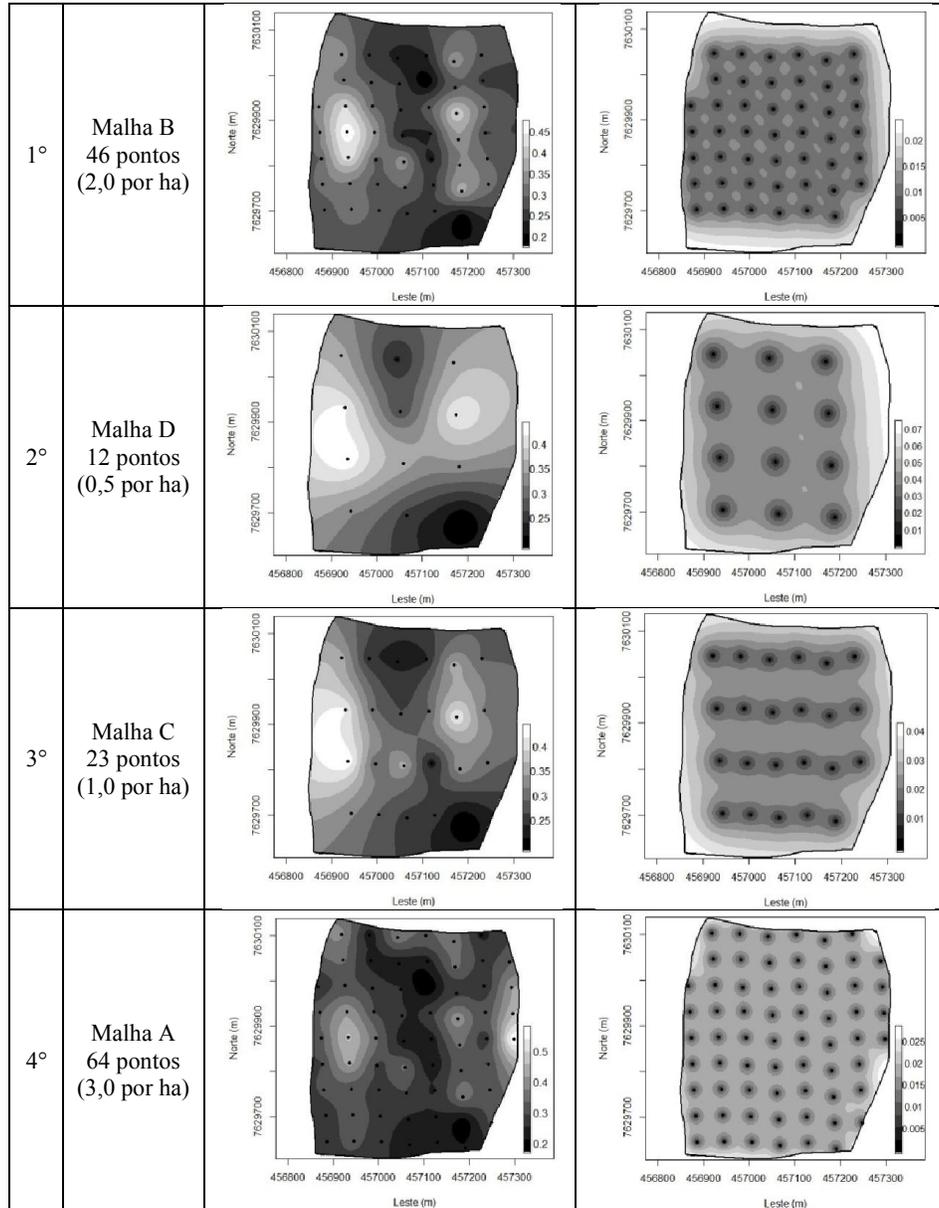


Figura 61 - Distribuição espacial do S (%) em junho de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

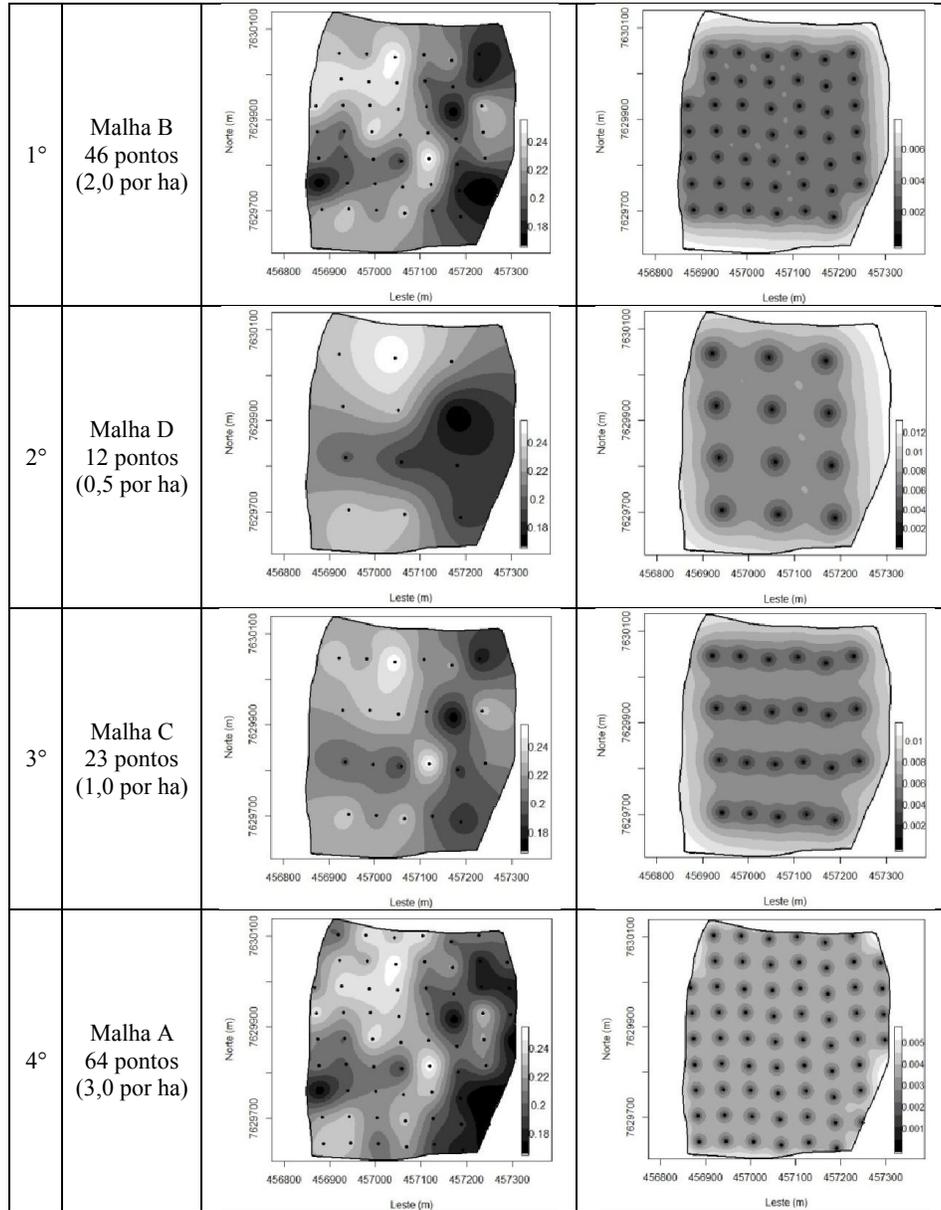


Figura 62 - Distribuição espacial do S (%) em dezembro de 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

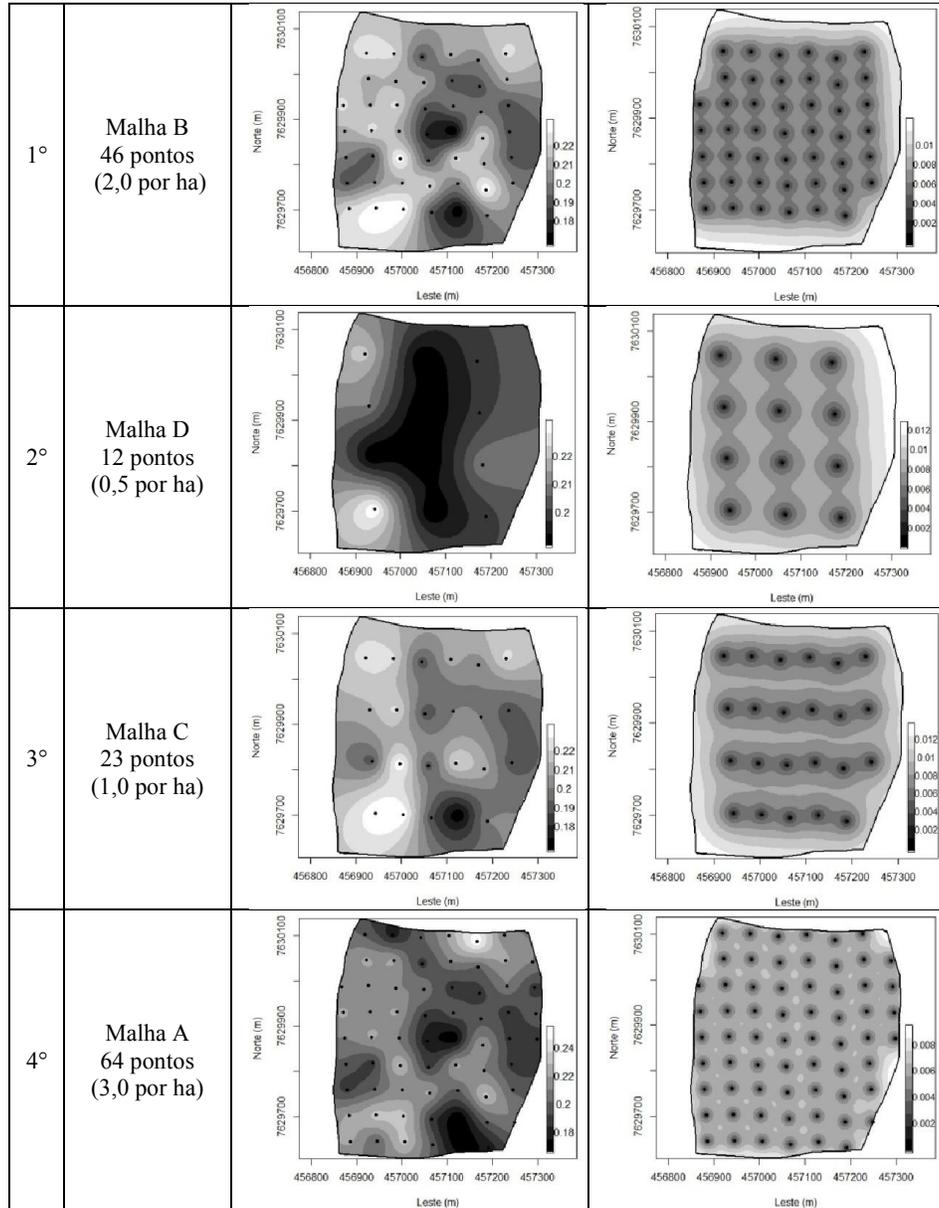


Figura 63 - Distribuição espacial do S (%) em junho de 2013 para as diferentes malhas de amostragem.

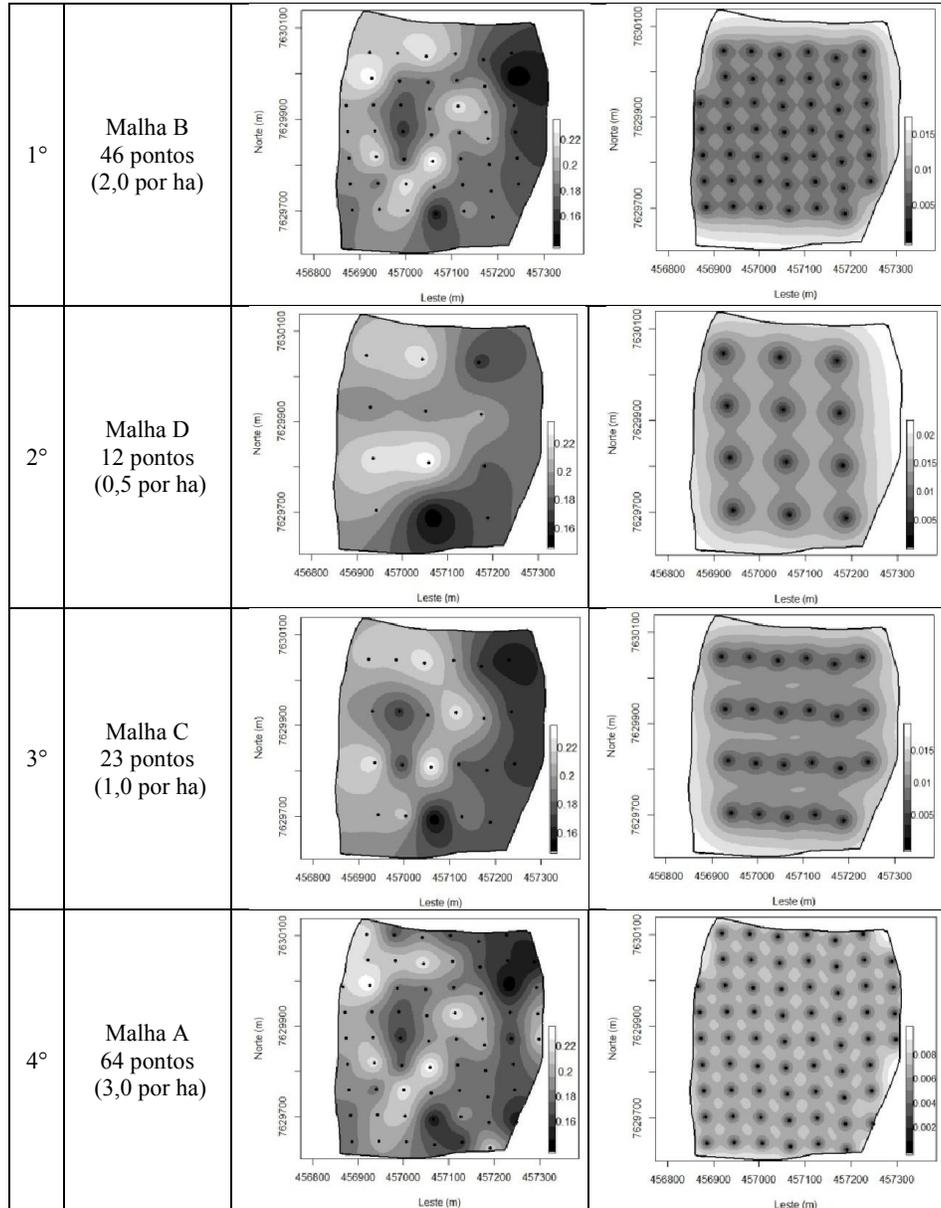


Figura 64 - Distribuição espacial da produtividade do cafeeiro em 2012 para as diferentes malhas de amostragem.

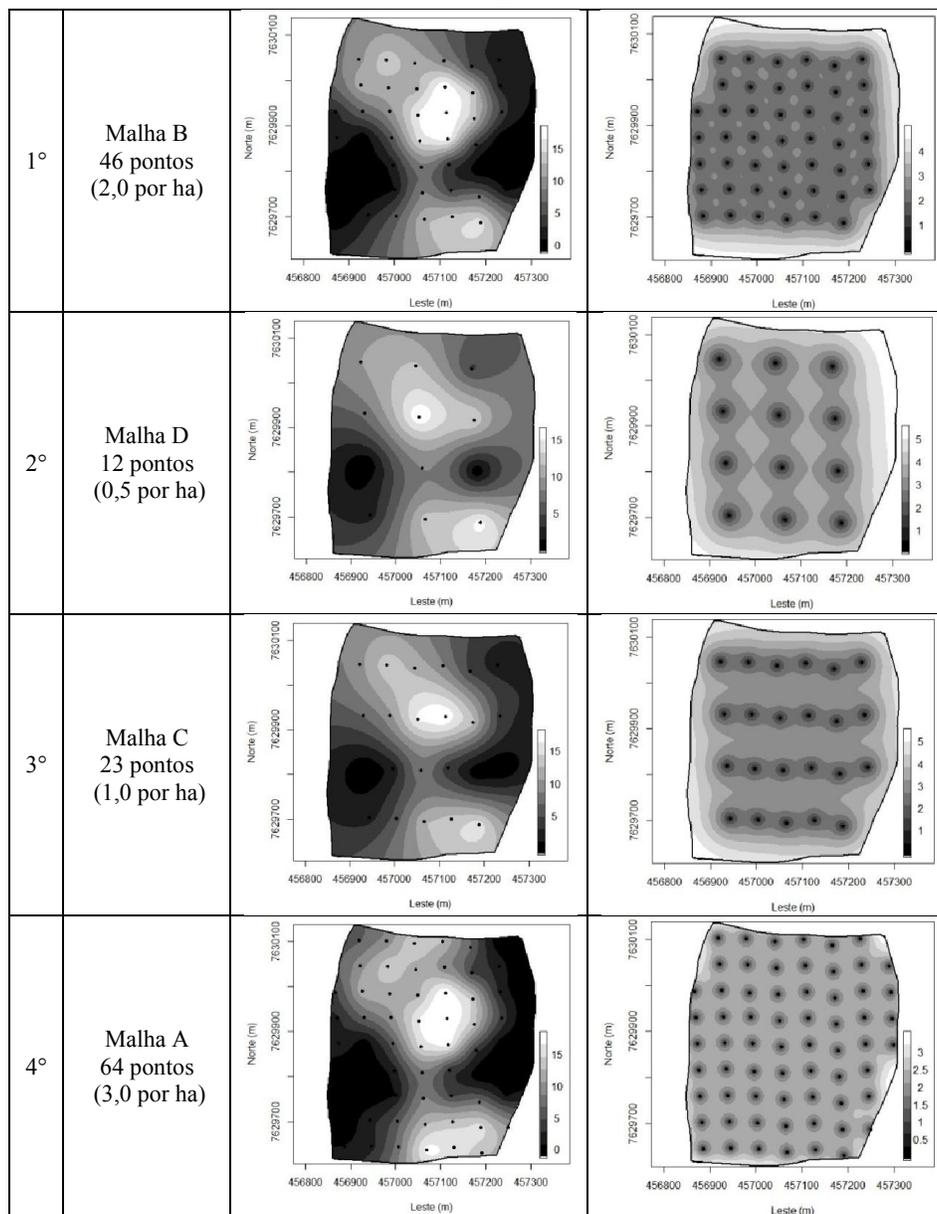
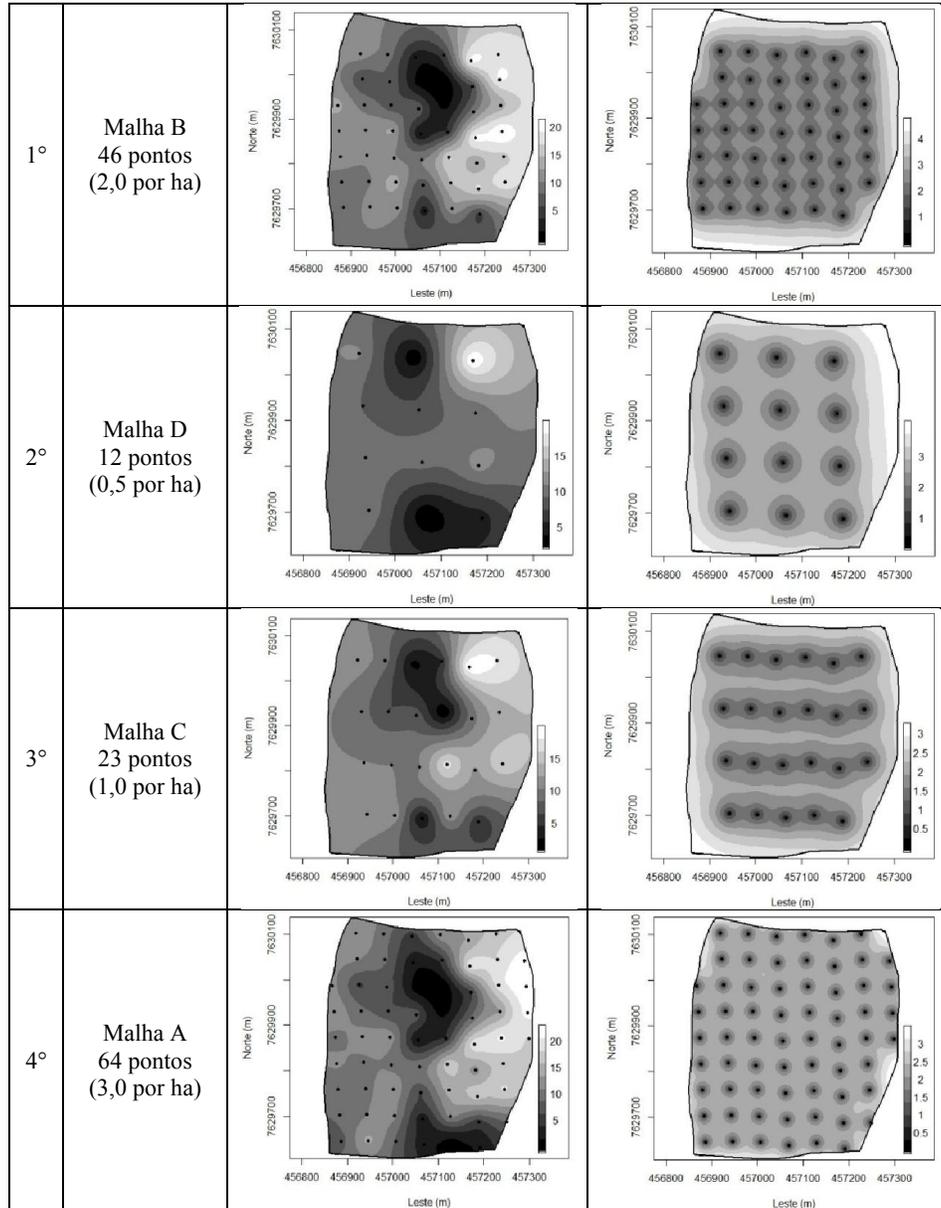


Figura 65 - Distribuição espacial da produtividade do cafeeiro em 2013 para as diferentes malhas de amostragem.



4 CONCLUSÕES

Em todas as malhas, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo e da nutrição foliar, bem como para a produtividade do cafeeiro, foi possível caracterizar a magnitude da variabilidade espacial existente, permitindo, então, a obtenção dos parâmetros da validação.

Foi possível a utilização do índice de exatidão (IE) e do índice de precisão (IP) para a avaliação das malhas de amostragem, bem como o uso do indicador de malha ótima (IMO) que permitiu identificar a malha mais adequada para as diferentes variáveis.

O IMO identifica a malha B (2,0 pontos por hectare) para avaliação da fertilidade do solo e da nutrição foliar. Considerando todos os dados e determinando o IMO médio, a malha mais adequada para a cafeicultura de precisão foi a B. Dessa forma, com base nas condições deste trabalho, recomenda-se que, na cafeicultura de precisão, a retirada de amostras georreferenciadas seja realizada obedecendo a retirada de 2,0 pontos por hectare.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C. Cafeicultura de precisão. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 189-223.
- CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1240-1248, 1994.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 8, n. 6, p. 1501-1511, 1994.
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 1, p. 5-14, 1999.
- CARVALHO, J. G. et al. Sintomas de desordens nutricionais em cafeeiro. In: GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas**. Lavras: UFLA, 2010. p. 69-101.
- CHERUBIN, M. R. et al. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 425-432, mar. 2014.
- FERNANDES, A. L. T. et al. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 231-240, abr./jun. 2012.
- FERRAZ, G. A. S. **Cafeicultura de precisão: malhas amostrais para o mapeamento de atributos do solo, da planta e recomendações**. 2012. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012.

_____. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.

FLOWERS, M.; WEISZ, R.; WHITE, J. G. Yield-based management zones and grid sampling strategies: describing soil test and nutrient variability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 968-982, 2005.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, mar./abr. 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.

KERRY, R. et al. Sampling in precision agriculture. In: OLIVER, M. A. (Org.). **Geostatistical applications for precision agriculture**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 35-63.

MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 1, p. 69-77, jan. 2005.

MONTANARI, R. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, 2008.

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

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <<http://www.Rproject.org/>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

RAGAGNIN, V. A.; SENA JUNIOR, D. G. de; SILVEIRA NETO, A. N. da. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 600-607, 2010.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

WEBSTER, R.; LARK, M. **Field sampling for environmental science and management**. London: Routledge, 2012. 200 p.

CAPÍTULO 3 CAFEICULTURA DE PRECISÃO NA IDENTIFICAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE VARIÁVEIS AGRONÔMICAS, EM TRÊS ÉPOCAS

RESUMO

As análises da fertilidade do solo e da nutrição foliar são métodos eficientes para a avaliação do estado nutricional de lavouras cafeeiras, contribuindo para obtenção de elevadas produtividades. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar a variabilidade espacial de variáveis relacionadas com a fertilidade do solo, análise foliar e produtividade de uma lavoura cafeeira, em três épocas, além de verificar quais as variáveis que têm relação espacial com a produtividade do cafeeiro. Ainda objetivou-se comparar a amostragem proposta para a cafeicultura de precisão com os teores médios observados na lavoura quando utilizada a amostragem segundo a agricultura convencional, com base nos teores médios das variáveis avaliadas. A área experimental tem 22 hectares e está localizada no município de Três Pontas, estado de Minas Gerais, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico argiloso, cultivado com café Topázio. Em 46 pontos foram coletadas amostras de solo, folhas e de produtividade de plantas em três épocas: junho de 2012, dezembro de 2012 (exceto a produtividade), e junho de 2013. Os dados foram analisados por estatística descritiva e por geoestatística. Identificou-se dependência espacial para todas as variáveis que, de modo geral, apresentaram grau de dependência espacial moderado e forte. Em junho de 2012, apresentaram relação espacial com a produtividade a variável de solo P-rem e os teores foliares de N, Mg e Ca. Para junho de 2013, apenas o teor de cálcio foliar apresentou relação espacial com a produtividade. Foi possível identificar as diferenças apresentadas pelas variáveis pelos dois tipos de amostragem, tendo a cafeicultura de precisão permitido identificar melhor a amplitude de valores que as variáveis podem expressar na lavoura, o que permite estabelecer estratégias de manejo mais eficientes.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. *Coffea arabic*. Geoestatística. Fertilidade do solo. Nutrição foliar.

ABSTRACT

Analyses of soil fertility and foliar nutrition are effective methods for assessing the nutritional status of coffee crops, helping to achieve higher yield. This study aimed to characterize the spatial variability of variables related to soil fertility, leaf analysis and coffee yield in three seasons, and to identify which variables have spatial relationship with coffee yield. Also aimed to compare the sample proposal for the precision coffee with the average levels observed in the crop when used sampling according to conventional agriculture, based on average levels of variables. The experimental area has 22 hectares and is located in the city of Três Pontas, State of Minas Gerais, in a Haplustox, cultivated with coffee Topazio. In 46 points were collected soil samples, leaves and plant yield in three times: June 2012, December 2012 (excluding yield), and June 2013. Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics. It was identified spatial dependence for all variables, which generally showed degree of moderate and strong spatial dependence. In June 2012, presented spatial relationship with yield the soil variable P-rem and foliar N, Mg and Ca. In June 2013, only the leaf calcium content present spatial relationship with yield. It was possible to identify the differences presented by the variables the two types of sampling, having the precision of coffee allowed better identify the range of values that variables can express in the field, which allows for more efficient management strategies.

Keywords: Precision agriculture. *Coffea arabica*. Geostatistics. Soil fertility. Foliar nutrition.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2015), estima-se que a produção da safra cafeeira (espécies arábica e conilon) foi de 42,15 milhões de sacas beneficiadas de 60 Kg, sendo que o estado de Minas Gerais responde por 51,86% desse total. A fim de melhorar o sistema produtivo da cadeia do café, inovações vêm sendo adotadas, permitindo maior eficiência na atividade agrícola.

Dentre estas inovações, produtores rurais vêm, cada vez mais, adotando a agricultura de precisão no gerenciamento de suas lavouras. Segundo definição do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2013), a agricultura de precisão é um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando ao aumento de retorno econômico e à redução do impacto ao ambiente. Os mapas temáticos criados possibilitam ao agricultor uma visão mais ampla das condições reais de sua propriedade, permitindo que novas estratégias de manejo possam ser adotadas, de acordo com Queiroz, Dias e Mantovani (2000) e Schueller (2000). É possível identificar na lavoura os locais em que há condições críticas para o desenvolvimento das plantas e, dessa forma, realizar o manejo adequado nesses locais.

A cafeicultura de precisão refere-se ao emprego de técnicas de agricultura de precisão na produção de café (ALVES; QUEIROZ; PINTO, 2006). Balastreire et al. (2001) afirmam que ao comparar as ferramentas propostas para culturas de cereais em relação às culturas perenes, verifica-se que a primeira tem uma série de pacotes tecnológicos desenvolvidos e já consagrados. Atualmente, o cenário não é diferente. Para Silva e Alves (2013) devido à importância econômica da atividade cafeeira para o país, justificam-se o desenvolvimento e a adequação de ferramentas para a cafeicultura de precisão,

de modo a proporcionar aos produtores rurais um menor custo e tornar a atividade competitiva. Para tanto, é preciso conhecer de modo detalhado as variáveis que controlam o sistema solo-planta-atmosfera e como elas se comportam no espaço e no tempo (CORÁ et al., 2004; GREGO; VIEIRA, 2005).

O equilíbrio nutricional da lavoura é importante, uma vez que os nutrientes minerais têm funções específicas e essenciais ao metabolismo das plantas. O nitrogênio desempenha papel importante na expansão da área foliar, no crescimento vegetativo e na formação de botões florais, sendo constituinte de aminoácidos. Localiza-se, principalmente, nos cloroplastos das folhas, exercendo função importante na atividade fotossintética. Já o fósforo desempenha papel fundamental nas transformações energéticas dos processos vitais da planta, tais como, fotossíntese, respiração, síntese de aminoácidos, lipídeos, entre outros. Quanto ao potássio, apresenta as funções de síntese e transporte de carboidratos para os frutos, o desenvolvimento de raízes e a alongação do colmo, ativa cerca de 60 enzimas, controla a turgidez das plantas e oferece à planta maior resistência a doenças. O cálcio é componente dos pectatos, que são constituintes da parede celular, o magnésio é importante na formação da clorofila, além de aumentar a absorção de fósforo, e o enxofre é importante na síntese de clorofila e no desenvolvimento de raízes. Em relação aos micronutrientes, a maioria atua como catalisadores de reações enzimáticas, o que não diminui a importância dos mesmos para as plantas (CARVALHO et al., 2010).

A produtividade do cafeeiro é significativamente influenciada pela fertilidade do solo, tanto que a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG) elaborou as "Recomendações para o uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais", 5ª aproximação, para a cafeicultura de sequeiro (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE

MINAS GERAIS - CFSEMG, 1999). Diversos fatores influenciam a dinâmica dos nutrientes no solo, condicionando a capacidade do solo de suprir plantas desses nutrientes, sendo a disponibilidade de nutrientes variável no espaço e no tempo (FURTINI NETO et al., 2001).

Frequentemente, os produtores rurais realizam o monitoramento do estado nutricional da lavoura, por meio da análise foliar. Vieira et al. (2010) destacam que, apesar de a análise química do tecido vegetal fornecer um panorama da nutrição da planta num estágio avançado de desenvolvimento, essa é sem dúvida uma das melhores formas de se avaliar a disponibilidade dos nutrientes no solo, pois se utiliza a planta como extrator de elementos químicos do solo. Os resultados da análise foliar são comparados com padrões obtidos de populações de plantas altamente produtivas, da mesma espécie e variedade (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Para o cafeeiro, são muitas as recomendações encontradas na literatura (MALAVOLTA, 1993; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MATIELLO, 1997; MILLS; JONES JUNIOR, 1996; REUTER; ROBINSON, 1988; WILLSON, 1985). Entretanto, para uma análise mais precisa, é necessário considerar padrões específicos para uma determinada região. .

Em virtude da aplicação homogênea de insumos em toda a área na agricultura convencional, a hipótese deste trabalho é a de que não há estrutura de dependência espacial de variáveis do sistema produtivo de uma lavoura de café, para uma mesma espécie vegetal em diferentes épocas. Este trabalho foi realizado com os objetivos de caracterizar a variabilidade espacial de variáveis relacionadas com a fertilidade do solo, análise foliar e produtividade de uma lavoura cafeeira, em três épocas, além de verificar quais variáveis têm relação espacial com a produtividade do cafeeiro. Ainda objetivou-se comparar a cafeicultura de precisão com os teores médios observados na lavoura, quando

utilizada a agricultura convencional, com base nos teores médios das variáveis avaliadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na fazenda Brejão, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico - LVd, de textura argilosa, localizada no município de Três Pontas, sul do estado de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas médias 21°25'58 " de latitude Sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich, altitude máxima de 914,7 m. A área experimental possui 22 hectares cultivados com café (*Coffea arabica* L.) cultivar Topázio, tendo a lavoura sido implantada em 2005 no espaçamento 3,8 metros entre linhas e 0,8 metros entre plantas.

O manejo da lavoura foi o mesmo descrito detalhadamente no item 2.1, do capítulo 2 deste trabalho.

2.2 Coleta de dados

Os dados foram coletados seguindo dois tipos de amostragem, cafeicultura de precisão e convencional, e em três épocas: junho de 2012; dezembro de 2012; e junho de 2013.

Para a amostragem, segundo a cafeicultura de precisão (Figura 1), a área experimental foi demarcada por meio de um GPS topográfico Topcon FC 100 (com erro médio de 10 cm), em uma malha amostral de 46 pontos, uma vez que foi a mais indicada de acordo com o capítulo 2. A distância mínima e máxima entre os pontos é de 52,73 e 486,97 metros, respectivamente. Em relação à amostragem convencional, a área experimental foi dividida ao meio em dois lados, lado A e lado B, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 1 - Croqui da área experimental para a cafeicultura de precisão - malha de 46 pontos.

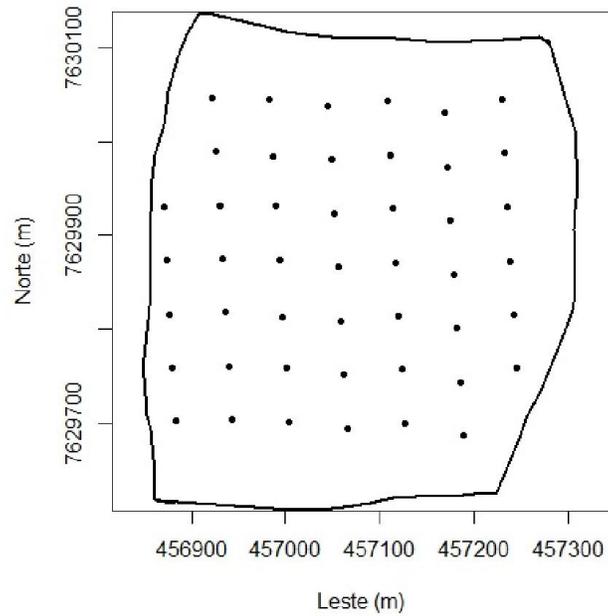
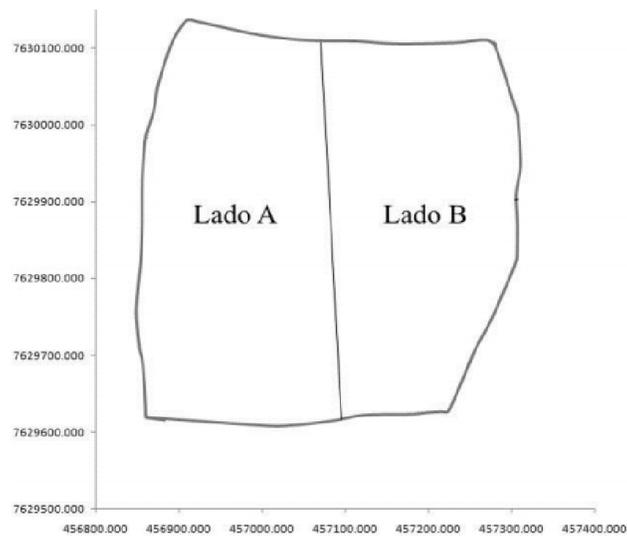


Figura 2 - Croqui da área experimental para o manejo convencional.



Fonte: Ferraz et al. (2015).

Para cada tipo de amostragem foram avaliados dados de: fertilidade do solo; nutrição foliar; e produtividade do cafeeiro.

2.2.1 Coleta de amostras de solo

A retirada e o processamento das amostras seguiram os procedimentos descritos no capítulo 2. Foram coletadas amostras de solo de zero a vinte centímetros de profundidade, para a determinação de: pH, disponibilidade de potássio - K (mg.dm^{-3}), disponibilidade de fósforo - P (mg.dm^{-3}), cálcio trocável - Ca^{2+} ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), magnésio trocável - Mg^{2+} ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), acidez trocável - Al^{3+} ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), soma de bases - SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), CTC efetiva - t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), CTC potencial - T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), saturação por bases - V(%), saturação por alumínio - m(%), matéria orgânica - M.O. (dag.Kg^{-1}) e fósforo remanescente - P-rem (mg.L^{-1}).

Para a malha proposta pela cafeicultura de precisão, em cada um dos 46 pontos, foi coletada uma amostra de solo composta. Segundo a amostragem convencional, foram coletadas amostras compostas de dez pontos aleatórios, para cada lado.

2.2.2 Coleta de amostras foliares

Para a coleta e o processamento das amostras foliares para a cafeicultura de precisão, foram obedecidos os procedimentos descritos no capítulo 2. Foram coletadas amostras foliares para avaliar o teor dos macronutrientes N (%), P (%), K (%), Ca (%), Mg (%) e S (%).

No caso da amostragem convencional, para cada lado (Lado A e Lado B) foram coletados o terceiro ou o quarto par de folhas na altura do terço médio, nos quatro pontos cardeais, de 10 plantas aleatórias. Dessa forma, a amostra também foi constituída de 80 folhas.

2.2.3 Coleta de frutos para estimação da produtividade do cafeeiro

Para a coleta de dados da produtividade do cafeeiro foram seguidos os passos detalhados no capítulo 2.

A produtividade foi determinada para cada um dos 46 pontos da amostragem em malha. Para a amostragem convencional foram coletados dados de dez pontos aleatórios para cada lado.

2.3 Análise e processamento dos dados

Após o processamento das amostras, os resultados foram analisados por meio de estatística descritiva e de geoestatística.

Na estatística descritiva foram determinados: o valor mínimo, o valor máximo, a média, a mediana, o desvio padrão, e o coeficiente de variação. A análise geoestatística foi feita seguindo-se os procedimentos descritos no capítulo 2, item 2.5.1.

Por fim, os mapas temáticos de cada variável foram comparados com os valores médios observados no manejo convencional, a fim de comparar o resultado das amostragens em relação ao valor recomendado da variável para a cultura do café. Para as variáveis de solo foram utilizados, como valores de referência, os encontrados em Alvarez et al. (1999), detalhados na Tabela 1. Já para as variáveis da análise foliar, foi utilizada a recomendação da Fundação Procafé (2015), descrita detalhadamente na Tabela 2.

Tabela 1 - Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica

Variável	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
T	≤1,60	1,61-4,30	4,31-8,60	8,61-15,0	>15
t	≤0,8	0,81-2,30	2,31-4,60	4,61-8,00	>8
M.O.	≤0,7	0,71-2,00	2,01-4,00	4,01-7,00	>7
Ca	≤0,4	0,41-1,20	1,21-2,40	2,41-4,00	>4
Mg	≤0,15	0,16-0,45	0,46-0,90	0,91-1,50	>1,5
SB	≤0,60	0,61-1,80	1,81-3,60	3,61-6,00	>6
V(%)	≤20	20,1-40,0	40,1-60,0	60,1-80,0	>80
P	≤4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-18,0	>18
K	≤15	16-40	41-70	71-120	>120

Variável	Muito baixo	Baixo	Médio	Alta	Muita alta
Al	≤0,2	0,21-0,50	0,51-1,00	1,01-2,00	>2
H+Al	≤1,0	1,01-2,50	2,51-5,00	5,01-9,00	>9
m(%)	≤15,0	15,1-30,0	30,1-50,0	50,1-75,0	>75

Variável	Muito baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito alto
pH	<4,5	4,5-5,4	5,5 - 6,0	6,1-7,0	>7

Fonte: Adaptado de Alvarez et al. (1999)

Tabela 2 - Padrões referenciais médios para avaliação de resultados de análise foliar do cafeeiro.

Nutrientes	Escala nutricional		
	Deficiente (com sintomas)	Limiar	Adequada
N (%)	<2,5	3,0	3,0-3,5
P (%)	<0,05	0,12	0,12-0,15
K (%)	<1,2	1,8	1,8-2,3
Ca (%)	<0,5	1,0	1,0-1,5
Mg (%)	<0,2	0,35	0,35-0,5
S (%)	<0,05	0,15	0,15-0,2

Fonte: Adaptado de Fundação Procafé (2015)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estatística descritiva

Os resultados da análise descritiva dos dados de fertilidade do solo coletados pela cafeicultura de precisão, bem como os valores médios observados no manejo convencional, estão expostos nas Tabelas 3, 4 e 5, referentes às coletas em junho/2012, dezembro/2012 e junho/2013, respectivamente. Nas Tabelas 6 e 10 mostram-se as classes das variáveis da fertilidade do solo em relação aos valores de referência (Tabelas 1 e 2), para a amostragem convencional (lados A e B) e para a média dos 46 pontos utilizados na cafeicultura de precisão. Em relação aos dados da análise foliar da amostragem em malha, os resultados estão expostos nas Tabelas 7, 8 e 9, para as coletas em junho/2012, dezembro/2012 e junho/2013, respectivamente. Para os dados da produtividade do cafeeiro em 2012 e em 2013, os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Pelos dados das Tabelas 3, 4, 5, 7, 8 e 9, verifica-se para todas as variáveis, independente da época de amostragem, que os valores médios encontrados por meio da amostragem proposta pela cafeicultura de precisão são diferentes dos obtidos pela amostragem convencional. Como resultado, têm-se diferentes classes para uma mesma variável (Tabelas 6 e 10). Furtini Neto et al. (2001) explica que o princípio geral de separação das classes, a grosso modo, baseia-se numa produção relativa (em porcentagem) para os níveis muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Portanto, uma classificação equivocada de uma variável faz com que o técnico responsável pela interpretação dos resultados emita uma recomendação de manejo não condizente com a realidade da área. Pelos dados da Tabela 6 observa-se que em junho de 2012 os valores médios da maioria das variáveis da fertilidade do solo encontravam-se abaixo dos valores de referência (Tabela 1), nas classes Baixo e Médio. Mesmo com a adubação e a

correção do solo, isso persistiu para junho de 2013. Em contrapartida, os valores médios das variáveis da nutrição foliar, para as três épocas, estavam todos acima da classe deficiente estabelecida pelos padrões de referência (Tabela 2).

Nas Tabelas 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 11, por meio da observação dos valores mínimos e máximos das variáveis, quando comparados com o valor médio, nota-se a amplitude de valores que podem ser expressos pela variável na lavoura. Apesar da identificação dessa amplitude de valores, quando sozinha, ela não é capaz de identificar na lavoura locais em que estão presentes os maiores ou os menores valores da variável ao longo da área. Portanto, é necessário o uso de uma ferramenta estatística que considere a relação espacial existente para cada variável, com o objetivo de identificar como é o seu comportamento no espaço. Para estudos da lavoura cafeeira, relatos semelhantes também são encontrados nos trabalhos de Corá et al. (2004), Ferraz et al. (2012), Sanches et al. (2005) e Silva et al. (2008). Para caracterizar a magnitude da dependência espacial destas variáveis para a cafeicultura de precisão, utiliza-se a análise geoestatística (VIEIRA, 2000).

Tabela 3 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
pH	4,20	5,50	4,82	4,80	0,33	6,78	4,70	4,80
K	40,00	224,00	118,10	116,00	45,43	38,46	108,00	104,00
P	1,71	44,06	7,40	5,47	16,51	223,19	6,16	13,64
Ca	0,20	2,90	1,12	1,05	0,62	55,80	0,80	1,20
Mg	0,10	0,90	0,28	0,20	0,18	65,33	0,20	0,30
Al	0,10	1,70	0,78	0,80	0,41	52,31	0,90	0,50
H+Al	3,24	9,83	6,81	7,04	1,60	23,52	7,87	6,30
SB	0,40	4,25	1,70	1,62	0,88	51,50	1,28	1,77
t	1,60	4,35	2,49	2,42	0,57	22,78	2,18	2,27
T	6,35	11,57	8,51	8,42	1,12	13,20	9,15	8,07
V(%)	4,08	51,22	20,75	16,95	12,06	58,13	13,96	21,89
m(%)	2,30	78,12	35,11	35,90	21,06	59,97	41,28	22,03
M.O.	1,99	3,84	2,64	2,61	0,38	14,37	2,48	2,36
P-rem	5,63	19,58	11,54	10,99	3,05	26,41	13,33	12,53

K ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$); P ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$); Ca ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. ($\text{dag} \cdot \text{Kg}^{-1}$); P-rem ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%).

Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em dezembro de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
pH	3,90	5,70	4,67	4,60	0,48	10,24	5,20	4,50
K	72,00	184,00	123,40	125,00	32,52	26,36	168,00	106,00
P	2,00	29,76	5,61	4,00	4,84	86,19	6,16	4,48
Ca	0,60	4,20	2,07	2,00	0,91	44,05	2,30	1,70
Mg	0,10	1,40	0,51	0,50	0,30	58,23	0,70	0,30
Al2	0,00	1,30	0,38	0,30	0,35	92,50	0,10	0,40
H+Al	3,24	12,28	6,26	5,97	1,92	30,61	4,04	6,30
SB	0,92	6,05	2,89	2,69	1,26	43,64	3,43	2,27
t	1,72	6,05	3,27	3,12	0,98	29,98	3,53	2,67
T	6,86	13,20	9,15	9,08	1,13	12,35	7,47	8,57
V(%)	6,93	65,52	32,46	30,58	15,06	46,39	45,93	26,51
m(%)	0,00	58,56	15,08	9,13	15,96	105,82	2,83	14,98
M.O.	2,23	3,84	3,07	3,00	0,33	10,79	3,00	3,14
P-rem	4,72	20,88	13,76	13,13	3,83	27,85	13,33	9,91

K (mg.dm⁻³); P (mg.dm⁻³); Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); T (cmol_c.dm⁻³); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg⁻¹); P-rem (mg.L⁻¹); Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%).

Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras de solo provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2013, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
pH	4,30	6,10	4,91	4,90	0,45	9,20	5,00	5,00
K	46,00	132,00	88,87	87,00	22,91	25,78	100,00	92,00
P	2,30	39,56	9,39	5,47	8,18	87,15	7,94	5,81
Ca	0,10	3,70	1,24	1,05	0,83	67,19	1,60	1,50
Mg	0,10	1,10	0,31	0,20	0,24	78,33	0,30	0,30
Al	0,00	1,60	0,75	0,80	0,48	63,75	0,60	0,30
H+Al	2,59	10,99	7,19	7,46	2,17	30,21	7,04	7,04
SB	0,37	5,10	1,78	1,44	1,11	62,14	2,16	2,04
t	1,53	5,10	2,53	2,35	0,71	28,21	2,76	2,34
T	6,57	12,55	8,98	9,10	1,38	15,32	9,20	9,08
V(%)	3,67	66,29	21,45	15,90	15,59	72,67	23,44	22,42
m(%)	0,00	81,22	34,49	35,83	24,01	69,62	21,74	12,82
M.O.	2,36	5,26	3,17	3,07	0,54	17,18	3,41	2,74
P-rem	4,44	17,71	13,08	13,75	2,90	22,21	11,75	6,47

K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. ($\text{dag}\cdot\text{Kg}^{-1}$); P-rem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%)

Tabela 7 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
N (%)	2,40	3,10	2,70	2,70	0,15	5,57	2,50	2,70
P (%)	0,11	0,18	0,15	0,15	0,02	11,41	0,17	0,14
K (%)	1,57	3,42	2,28	2,26	4,30	188,57	2,16	1,96
Ca (%)	0,98	3,08	1,63	1,67	0,45	27,76	1,63	1,29
Mg (%)	0,21	0,53	0,33	0,33	0,07	21,34	0,36	0,24
S (%)	0,17	0,25	0,21	0,21	0,02	10,02	0,20	0,21

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%).

Tabela 8 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em dezembro de 2012, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis.

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
N (%)	2,60	3,50	3,13	3,10	0,17	5,41	3,10	3,00
P (%)	0,11	0,18	0,14	0,15	0,02	11,62	0,14	0,14
K (%)	2,16	3,37	2,69	2,67	0,23	8,61	2,78	2,75
Ca (%)	0,65	1,23	0,91	0,92	0,13	14,69	0,85	0,76
Mg (%)	0,19	0,33	0,28	0,29	0,04	12,87	0,26	0,23
S (%)	0,17	0,23	0,21	0,21	0,02	7,28	0,21	0,19

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%).

Tabela 9 - Estatística descritiva das variáveis provenientes da análise de amostras foliares provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão, coletadas em junho de 2013, e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
N (%)	2,40	3,10	2,74	2,70	0,13	4,83	2,80	2,80
P (%)	0,11	0,20	0,15	0,16	0,02	12,77	0,19	0,14
K (%)	1,44	2,48	1,90	1,90	0,21	11,29	1,96	1,93
Ca (%)	0,77	2,62	1,55	1,60	0,34	22,18	1,50	1,34
Mg (%)	0,19	0,46	0,30	0,30	0,06	18,51	0,28	0,28
S (%)	0,14	0,23	0,19	0,19	0,02	10,81	0,13	0,17

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%)

Tabela 10 - Classificação dos valores médios das variáveis da nutrição foliar, resultantes da amostragem convencional e cafeicultura de precisão - CP (Média - n = 46), de acordo com a Fundação Procafé (2015).

Variável	Jun/12			Dez/12			Jun/13		
	Lado A	Lado B	CP	Lado A	Lado B	CP	Lado A	Lado B	CP
N (%)	Limiar	Limiar	Limiar	Adequado	Adequado	Adequado	Limiar	Limiar	Limiar
P (%)	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
K (%)	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Ca (%)	Adequado	Adequado	Acima de adequado	Limiar	Limiar	Limiar	Adequado	Adequado	Acima de adequado
Mg (%)	Adequado	Limiar	Limiar	Limiar	Limiar	Limiar	Limiar	Limiar	Limiar
S (%)	Adequado	Adequado	Acima de adequado	Adequado	Adequado	Acima de adequado	Limiar	Adequado	Limiar

Tabela 11 - Estatística descritiva da produtividade das plantas de café (L/planta), em 2012 e 2013, provenientes da amostragem da cafeicultura de precisão e valores médios encontrados pela amostragem convencional para estas variáveis

	Cafeicultura de precisão - amostragem em malha						Amostragem convencional	
	Mín	Máx	Méd	Md	DP	CV	Lado A	Lado B
Prod. 2012	0,05	17,46	6,99	5,86	5,50	78,64	6,15	7,10
Prod. 2013	0,08	20,08	10,15	10,12	5,08	50,03	10,35	13,43

Prod. 2012 - Produtividade do café (L/planta) em 2012; Prod. 2013 - Produtividade do café (L/planta) em 2013; Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Md - Mediana; DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação (%)

3.2 Análise geoestatística

Por meio da análise geoestatística, foi possível identificar a variabilidade espacial para todas as variáveis avaliadas, pois a diferença entre duas amostras aumentou para distâncias entre coletas cada vez maiores. Dessa forma, ocorreu a estabilidade do semivariograma, definindo a distância máxima em que a variável possui dependência espacial. Para as variáveis da análise de solo em cada época de amostragem, os parâmetros de ajuste e os semivariogramas ajustados estão apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14, e nos Gráficos 1, 2 e 3. Em relação aos dados da análise foliar para cada época, os parâmetros de ajuste estão nas Tabelas 15, 16 e 17, e nos Gráficos 4, 5 e 6. Os parâmetros de ajuste e os semivariogramas da produtividade do cafeeiro, para 2012 e 2013, estão apresentados na Tabela 18 e no Gráfico 7.

O efeito pepita (C_0) é o valor da semivariância para a distância zero e representa a 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 (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; VIEIRA, 2000). Para as variáveis de solo coletadas em junho de 2012, verifica-se efeito pepita igual a zero somente para Al, H+Al, T, V(%) e P-rem. Para dezembro de 2012, o

mesmo ocorreu para as variáveis T e M.O. Em junho de 2013, verificou-se o mesmo resultado para K, Al, H+Al, T, V(%) e m(%). Em relação às variáveis da análise foliar, em junho de 2012, há efeito pepita igual a zero para o Ca e Mg. Já em dezembro de 2012, a condição é verificada para Ca e S. Em junho de 2013, o efeito pepita igual a zero só ocorre para S. Em relação à produtividade do cafeeiro, apenas para 2012 encontrou-se o mesmo resultado.

A maioria das variáveis apresentou grau de dependência espacial moderado ou forte. Apresentaram grau fraco as variáveis de solo: pH e Mg, para junho de 2012; P, para dezembro de 2012; e pH, t e M.O., para junho de 2013. Para as variáveis da análise foliar, observou-se a mesma condição para N, K e Mg, em junho de 2013.

O alcance representa a zona de influência de uma observação e separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes) (ANDRIOTTI, 2003), definindo o raio máximo para o qual amostras vizinhas são utilizadas para a interpolação por krigagem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Dessa forma, quanto menor o valor do alcance, menor será a quantidade de pontos utilizada para a interpolação. Verifica-se que os valores de alcance das variáveis avaliadas foram bastante distintos. Quando muitas variáveis são avaliadas, é comum encontrar valores de alcance discrepantes. Este fato também foi observado nos trabalhos de Lima et al. (2014) e Silva et al. (2007, 2008), com cafeicultura.

Para as variáveis da análise de solo coletado em junho de 2012, o alcance variou entre 54,7 e 287,0 metros, para o P e K, respectivamente. Para dezembro de 2012, o menor valor foi de 106,6 metros para a M.O., e o maior para a SB, 329,3 metros. Em junho de 2013, os valores de alcance foram de 77,4 até 373,6 metros, para o V e P, respectivamente.

Em relação às variáveis da análise foliar para a coleta de junho de 2012, o menor valor foi para o N e o maior para o S, 105,4 e 230,0 metros,

respectivamente. Em dezembro de 2012, a variação foi entre 100,0 e 220,0, para o N e Mg, respectivamente. Para junho de 2013, os valores de alcance variaram de 120,0 para o K até 240,0 metros para o P.

Os valores de alcance da produtividade do cafeeiro foram 210,4 metros para 2012 e 158,5 metros para o ano de 2013.

Tabela 12 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em junho de 2012.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
pH	0,0978	0,0212	0,1190	140,0	82,2	Fra
K	493,5495	2036,0909	2529,6404	287,0	19,5	For
P	27,6177	20,0400	47,6577	54,7	58,0	Mod
Ca	0,2148	0,2307	0,4455	142,4	48,2	Mod
Mg	0,0298	0,0099	0,0397	160,0	75,1	Fra
Al	0,0000	0,1812	0,1812	81,3	0,0	For
H+Al	0,0000	2,8442	2,8442	85,0	0,0	For
SB	0,6254	0,2762	0,9016	250,0	69,4	Mod
T	0,1334	0,2597	0,3931	190,0	33,9	Mod
T	0,0000	1,4694	1,4694	104,9	0,0	For
V(%)	0,0000	157,1693	157,1693	93,8	0,0	For
m(%)	291,9254	198,4054	490,3308	152,1	59,5	Mod
M.O.	0,0514	0,1239	0,1753	250,0	29,3	Mod
P-rem	0,0000	10,7993	10,7993	107,7	0,0	For

K (mg.dm⁻³); P (mg.dm⁻³); Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); T (cmol_c.dm⁻³); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg⁻¹); P-rem (mg.L⁻¹); C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial

Tabela 13 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em dezembro de 2012.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
pH	0,0004	0,2583	0,2587	240,0	0,2	For
K	311,1920	992,2299	1303,4219	310,4	23,9	For
P	19,8215	1,7128	21,5343	172,2	92,0	Fra
Ca	0,2676	0,7492	1,0168	298,4	26,3	Mod
Mg	0,0039	0,0923	0,0962	200,0	4,1	For
Al	0,0672	0,0695	0,1367	230,0	49,2	Mod
H+Al	1,7506	2,4657	4,2163	167,7	41,5	Mod
SB	0,4895	1,5240	2,0135	329,3	24,3	For
t	0,0224	1,1957	1,2181	295,5	1,8	For
T	0,0000	1,5156	1,5156	112,0	0,0	For
V(%)	90,7905	178,2398	269,0303	299,0	33,7	Mod
m(%)	158,7745	124,9168	283,6913	291,2	56,0	Mod
M.O.	0,0000	0,1220	0,1220	106,6	0,0	For
P-rem	9,2996	7,5483	16,8479	144,8	55,2	Mod

K (mg.dm⁻³); P (mg.dm⁻³); Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); T (cmol_c.dm⁻³); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg⁻¹); P-rem (mg.L⁻¹); C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial.

Tabela 14 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da fertilidade do solo, para a coleta em junho de 2013.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
pH	0,1709	0,0198	0,1907	150,0	89,6	Fra
K	0,0000	585,6486	585,6486	79,4	0,0	For
P	26,3770	53,1470	79,5240	373,6	33,2	Mod
Ca	0,5387	0,1220	0,6607	130,0	81,5	Mod
Mg	0,0486	0,0080	0,0566	150,0	85,9	Mod
Al	0,0000	0,2283	0,2283	80,5	0,0	For
H+Al	0,0000	4,6583	4,6583	78,9	0,0	For
SB	0,0000	1,1681	1,1681	78,3	0,0	For
t	0,3836	0,1068	0,4904	130,0	78,2	Fra
T	0,0000	2,0117	2,0117	85,9	0,0	For
V(%)	0,0000	228,8535	228,8535	77,4	0,0	For
m(%)	0,0000	568,3494	568,3494	82,7	0,0	For
M.O.	0,3098	0,0441	0,3539	120,0	87,5	Fra
P-rem	6,8306	2,3348	9,1654	99,2	74,5	Mod

K (mg.dm⁻³); P (mg.dm⁻³); Ca (cmol_c.dm⁻³); Mg (cmol_c.dm⁻³); Al (cmol_c.dm⁻³); H+Al (cmol_c.dm⁻³); SB (cmol_c.dm⁻³); t (cmol_c.dm⁻³); T (cmol_c.dm⁻³); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg⁻¹); P-rem (mg.L⁻¹); C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial

Tabela 15 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em junho de 2012.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
N (%)	0,0035	0,0201	0,0236	105,4	14,8	For
P (%)	0,0001	0,0003	0,0004	200,0	25,0	For
K (%)	0,0409	0,1228	0,1637	210,0	25,0	For
Ca (%)	0,0000	0,2509	0,2509	157,0	0,0	For
Mg (%)	0,0000	0,0061	0,0061	179,9	0,0	For
S (%)	0,0003	0,0001	0,0004	230,0	75,0	Mod

C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial

Tabela 16 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em dezembro de 2012.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
N (%)	0,0223	0,0090	0,0313	100,0	71,2	Mod
P (%)	0,0001	0,0002	0,0003	200,0	33,3	Mod
K (%)	0,0297	0,0290	0,0587	150,7	50,6	Mod
Ca (%)	0,0000	0,0196	0,0196	112,7	0,0	For
Mg (%)	0,0008	0,0008	0,0016	220,0	50,0	Mod
S (%)	0,0000	0,0002	0,0002	150,0	0,0	For

C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial

Tabela 17 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para as variáveis provenientes da análise da nutrição foliar, para a coleta em junho de 2013.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
N (%)	0,0146	0,0041	0,0187	176,4	78,1	Fra
P (%)	0,0001	0,0003	0,0004	240,0	25,0	For
K (%)	0,0372	0,0068	0,0440	120,0	84,5	Fra
Ca (%)	0,0170	0,1183	0,1353	210,0	12,6	For
Mg (%)	0,0027	0,0008	0,0035	200,0	77,1	Fra
S (%)	0,0000	0,0004	0,0004	170,0	0,0	For

C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial.

Tabela 18 - Parâmetros estimados para os semivariogramas ajustados pelo modelo esférico e utilizando o método dos quadrados mínimos ordinários, para a produtividade das plantas de café, para 2012 e 2013.

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GD	
Prod. 2012	0,0000	39,1321	39,1321	210,4	0,0	For
Prod. 2013	0,5071	29,4254	29,9325	158,5	1,7	For

Prod. 2012 - Produtividade do café (L/planta) em 2012; Prod. 2013 - Produtividade do café (L/planta) em 2013; C₀ - Efeito pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ - Patamar; a - alcance (m); GD - Grau de dependência espacial.

Gráfico 1 - Semivariogramas ajustados para as variáveis coletadas em Jun/12: pH; K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. ($\text{dag}\cdot\text{Kg}^{-1}$); P-rem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

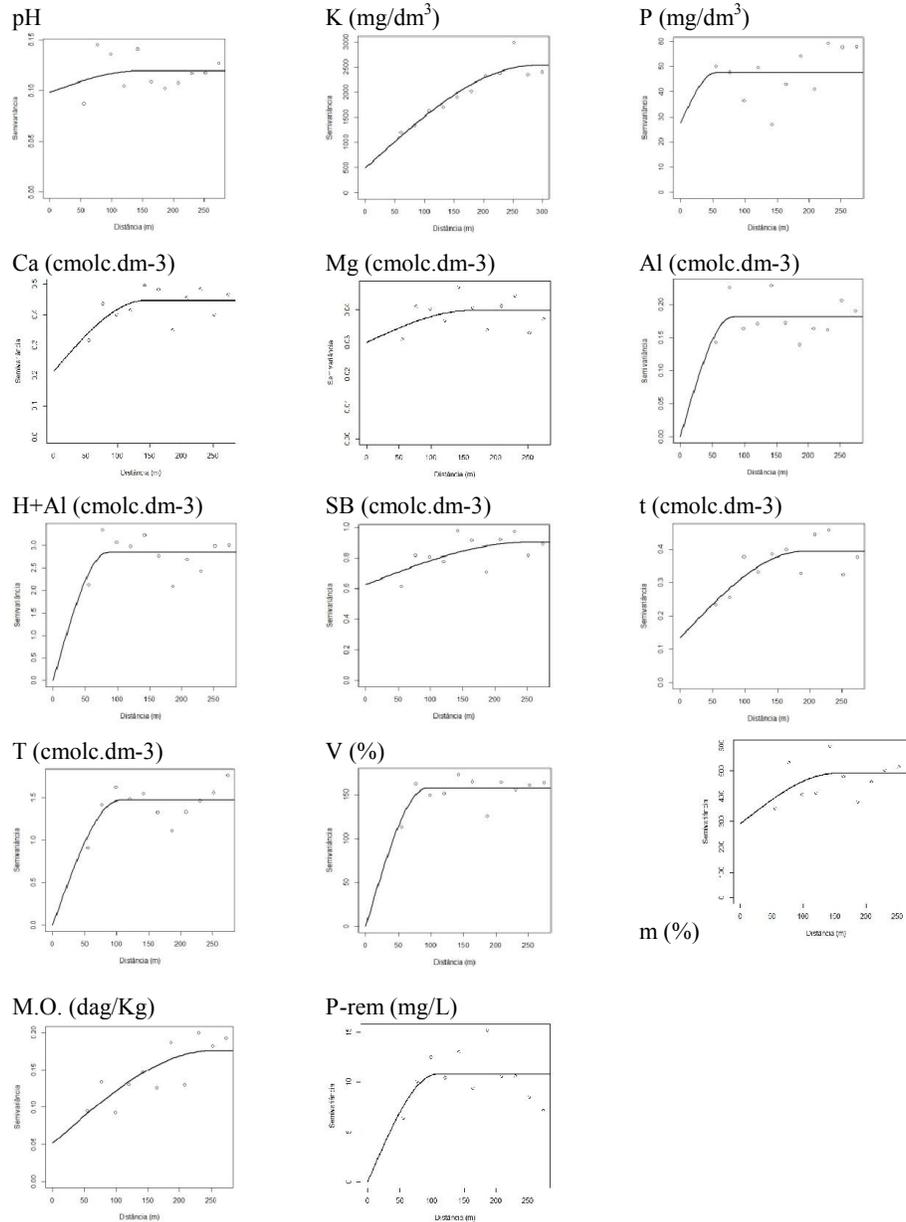


Gráfico 2 - Semivariogramas ajustados para as variáveis coletadas em Dez/12
 pH; K (mg.dm^{-3}); P (mg.dm^{-3}); Ca ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$);
 Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$);
 T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. (dag.Kg^{-1}); P-rem (mg.L^{-1}).

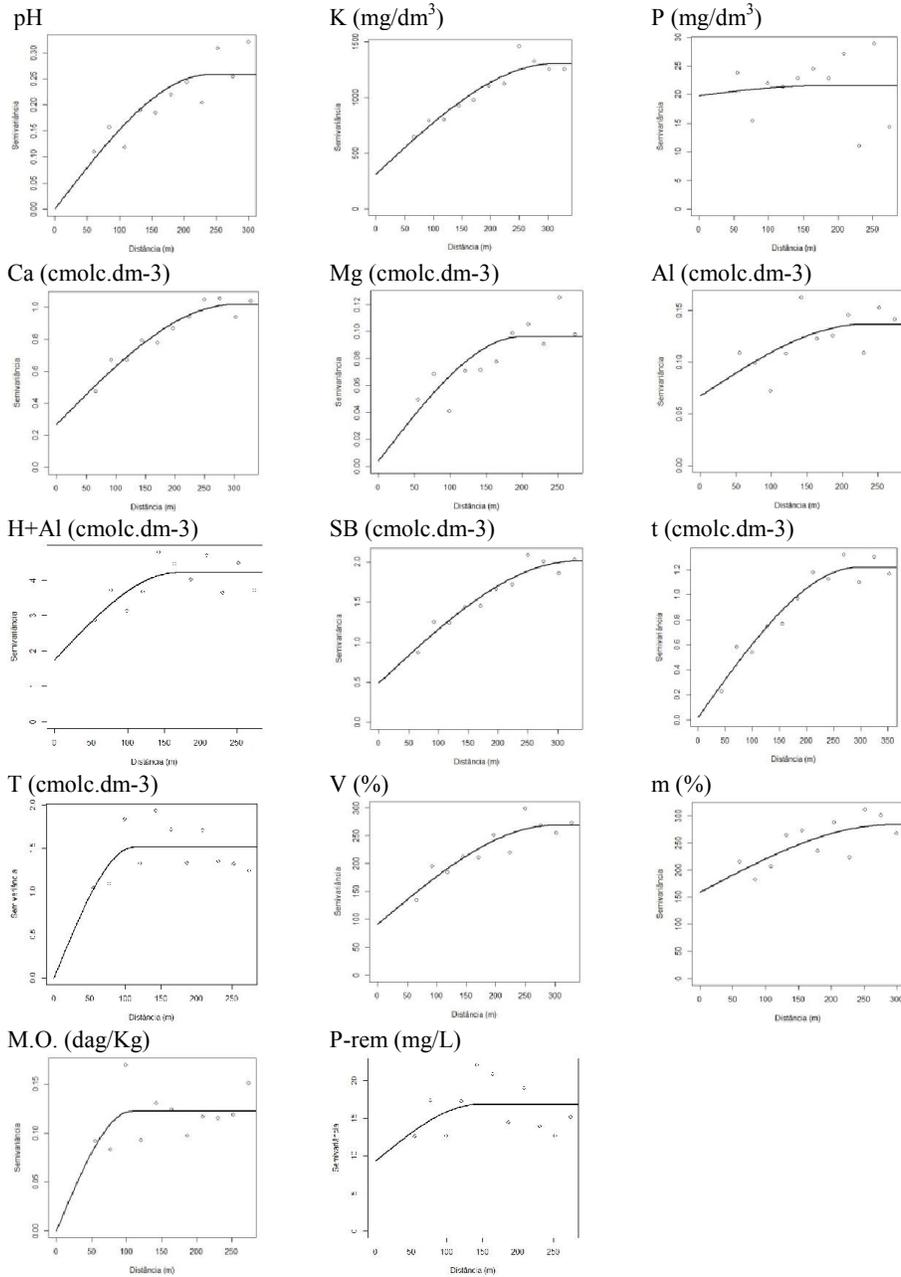


Gráfico 3 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de solo em Jun/13: pH; K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$); Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Mg ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); H+Al ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); SB ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); t ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); T ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$); V (%); m (%); M.O. ($\text{dag}\cdot\text{Kg}^{-1}$); P-rem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

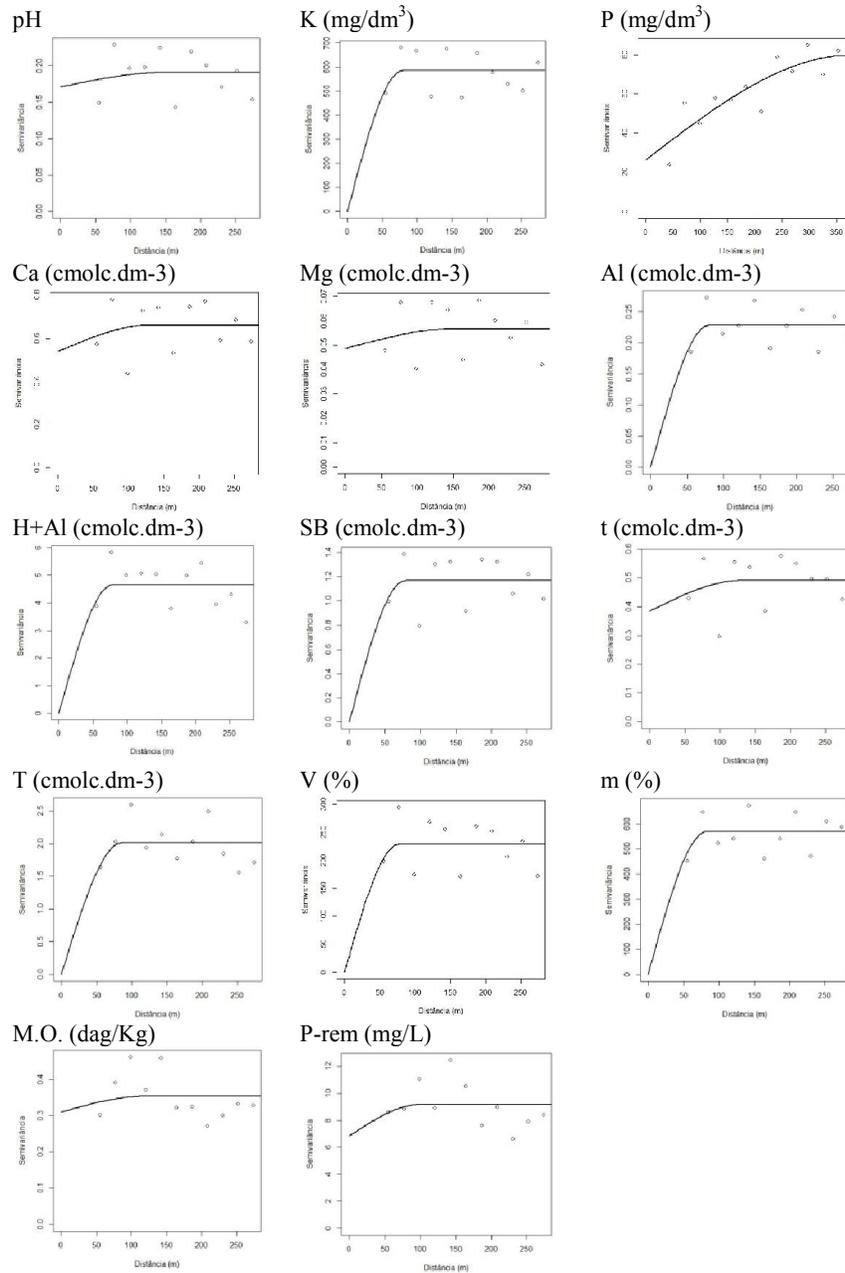


Gráfico 4 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Jun/12: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)

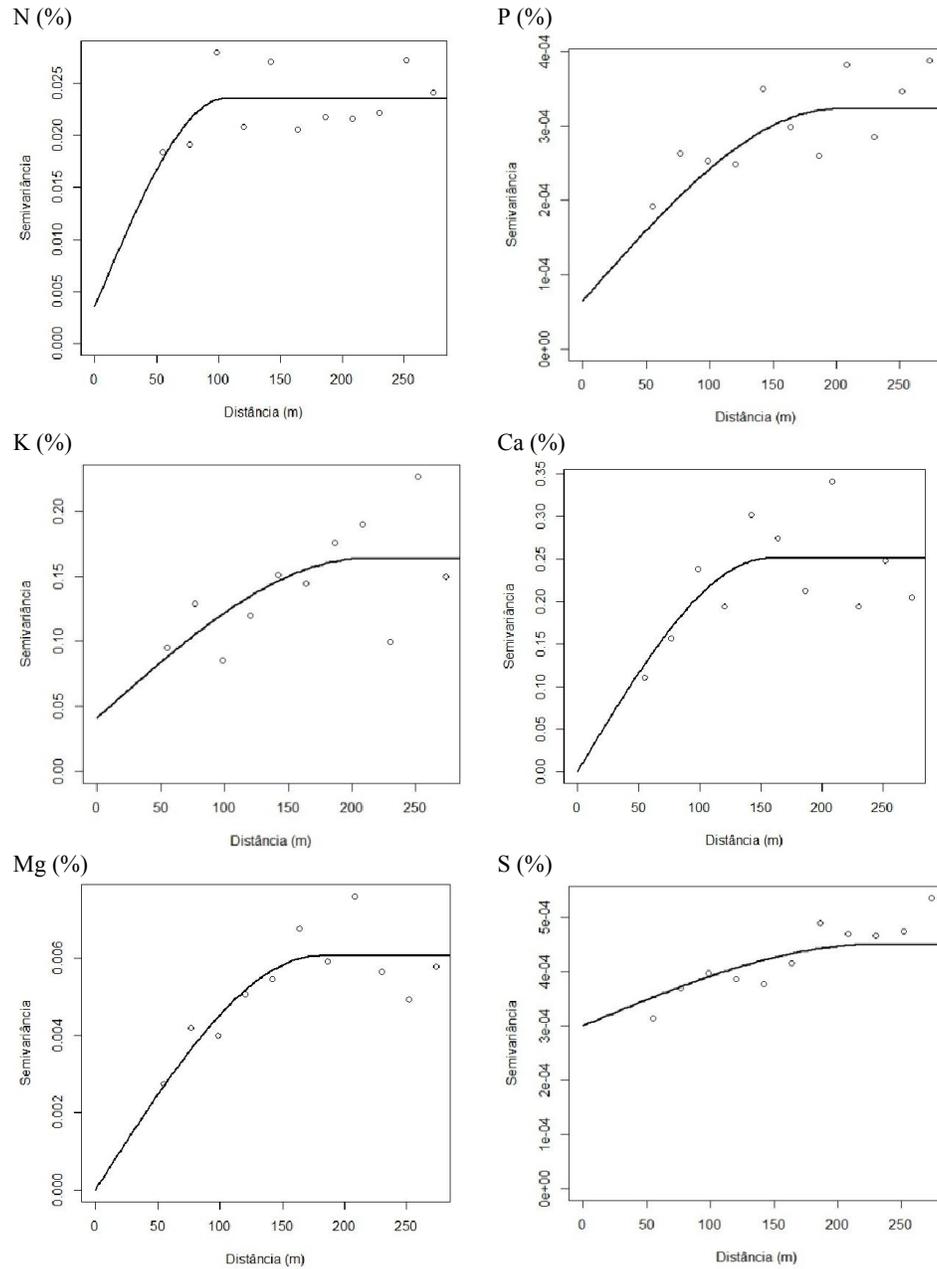


Gráfico 5 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Dez/12: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)

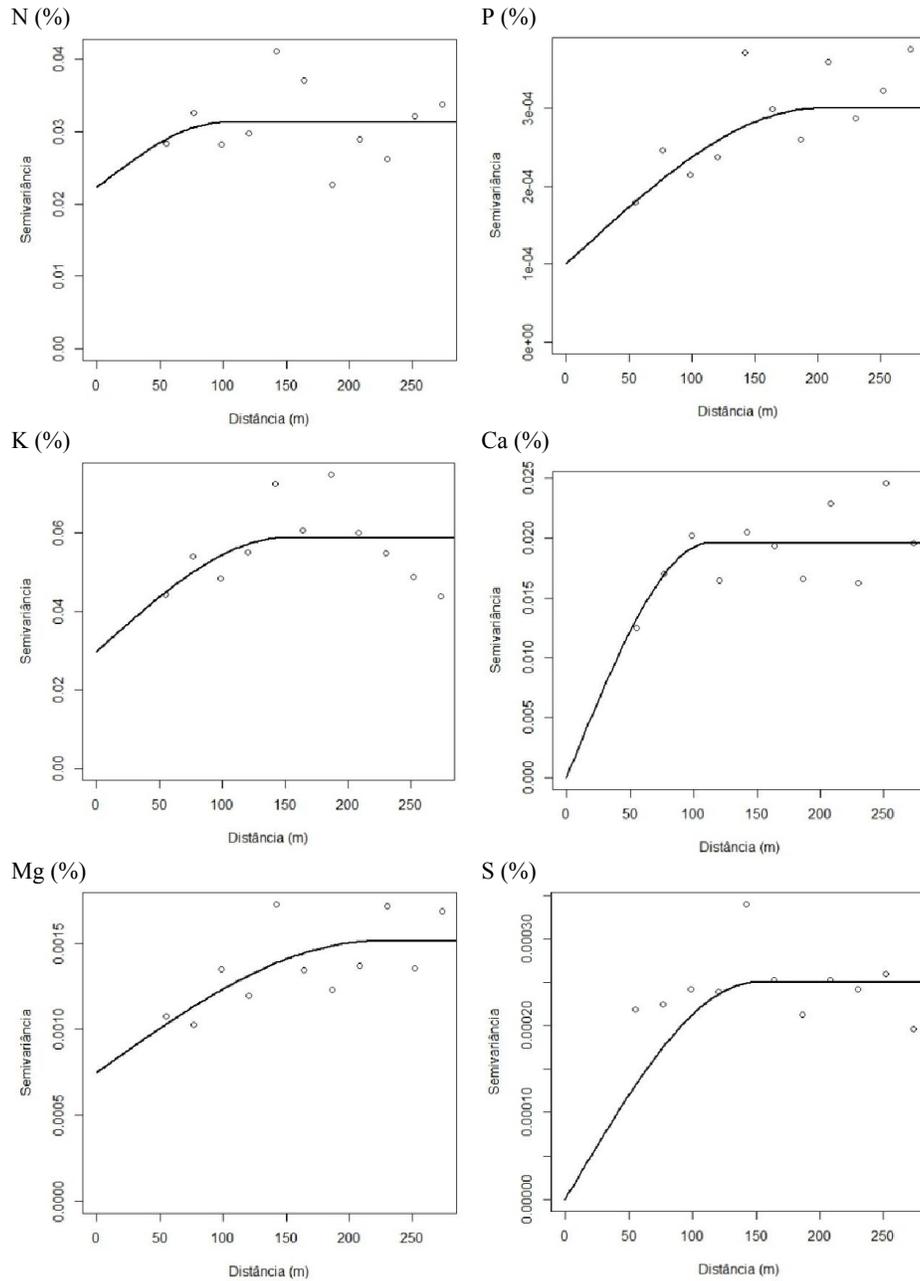


Gráfico 6 - Semivariogramas ajustados para as variáveis de análise foliar em Jun/13: N (%); P (%); K (%); Ca (%); Mg (%); e S (%)

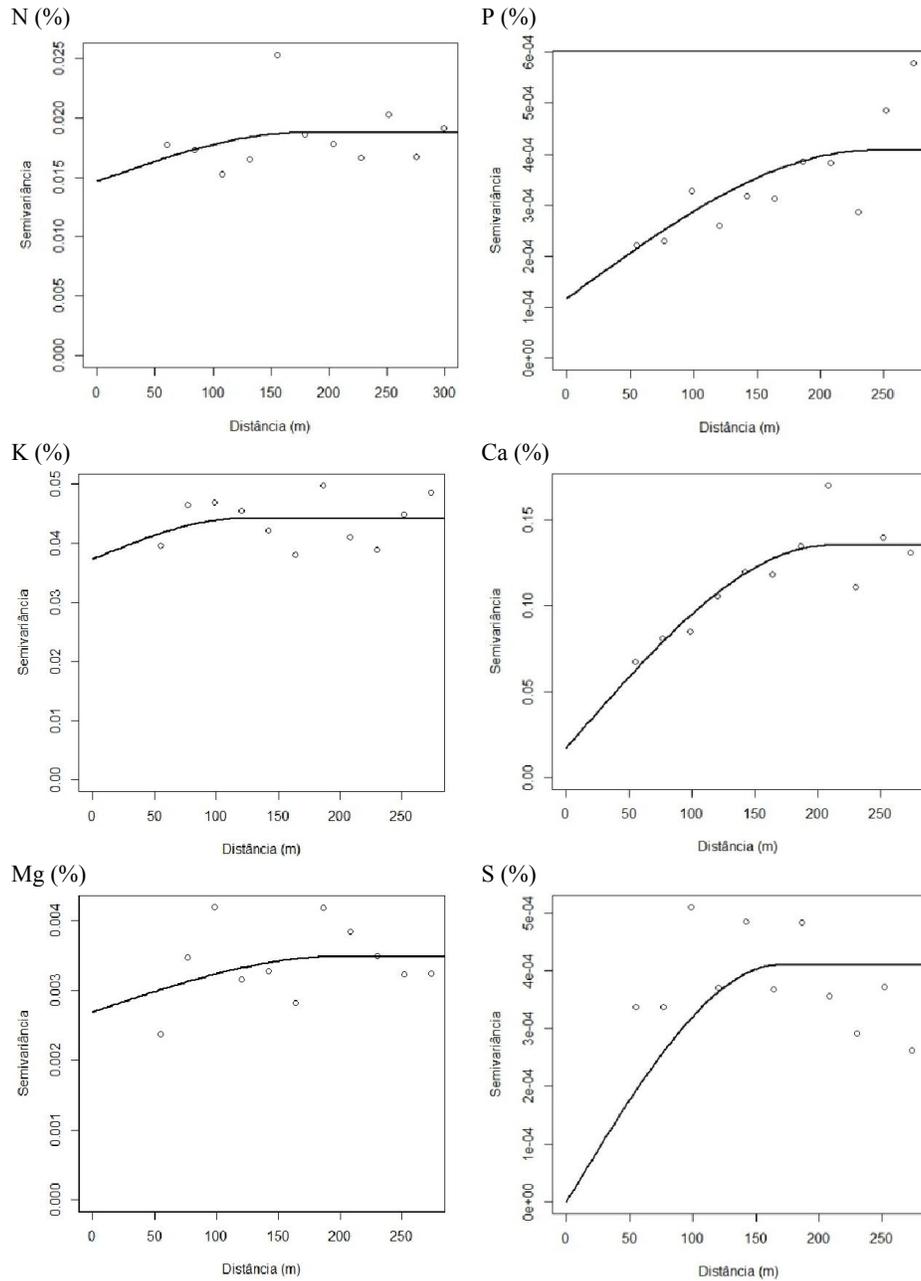
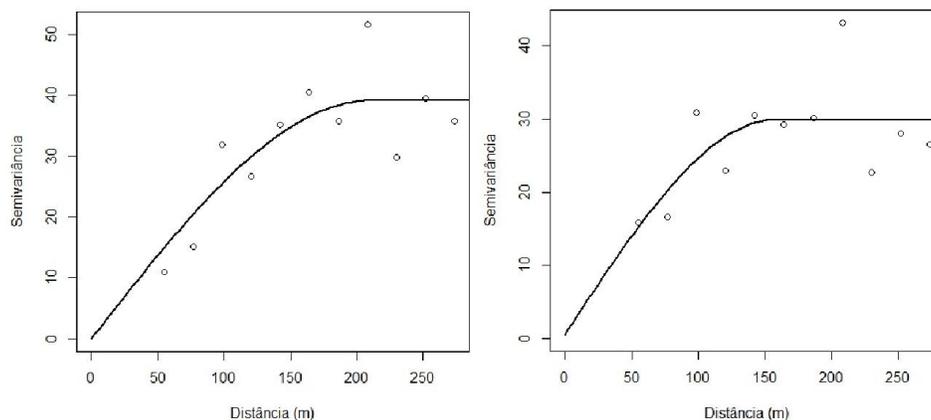


Gráfico 7 - Semivariogramas ajustados para a produtividade (L/planta) do café em 2012 (esquerda) e em 2013 (direita)



3.3 Mapas temáticos e comparação com a amostragem convencional, em função de valores de referência

Uma vez identificada a variabilidade espacial de todas as variáveis, por meio dos ajustes dos semivariogramas (Tabelas 12 a 18, Gráficos 1 a 7), estimaram-se valores destas variáveis para os locais em que não houve coleta de amostras, por meio de krigagem ordinária, possibilitando a criação de mapas temáticos com a distribuição espacial de cada variável (Figuras 3 a 13).

3.3.1 Fertilidade do solo

Os mapas temáticos das variáveis da análise da fertilidade do solo estão apresentados nas Figuras 3 a 9. Na Tabela 6 observam-se as classes das variáveis da fertilidade do solo resultantes da amostragem convencional proposta, segundo padrões de referência de Alvarez et al. (1999), detalhados na Tabela 1. Dessa forma, foi possível comparar os mapas temáticos resultantes da cafeicultura de precisão com os valores médios obtidos da amostragem convencional.

No Quadro 1 estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, de uma mesma variável para as diferentes

épocas de amostragem. Observou-se que, de modo geral, os dados que têm correlação apresentaram distribuição espacial semelhante.

Quadro 1 - Coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, para as variáveis de fertilidade do solo em diferentes épocas de amostragem.

		Dez/12			Dez/12
pH	Jun/12	Ns	SB	Jun/12	0,4891
	Jun/13	0,4596		Jun/13	0,5673
K	Jun/12	0,6179	t	Jun/12	0,5335
	Jun/13	0,4880		Jun/13	0,5308
P	Jun/12	Ns	T	Jun/12	0,4209
	Jun/13	Ns		Jun/13	0,3853
Ca	Jun/12	0,4498	V(%)	Jun/12	0,4635
	Jun/13	0,5689		Jun/13	0,5218
Mg	Jun/12	0,3798	m(%)	Jun/12	0,3919
	Jun/13	0,4485		Jun/13	0,5718
Al	Jun/12	Ns	M ₂ O ₃	Jun/12	Ns
	Jun/13	0,5721		Jun/13	Ns
H+Al	Jun/12	0,4015	P-rem	Jun/12	0,4207
	Jun/13	0,4626		Jun/13	0,3956

ns - não significativo.

Os mapas das variáveis de solo pH, para as três épocas, estão apresentados na Figura 3. De acordo com os dados do Quadro 1, o pH, em dezembro de 2012, tem correlação linear com o de junho de 2013, igual a 0,4596. Para o pH da coleta em junho de 2012, verifica-se que grande parte do mapa tem valor de pH classificado como "Baixo". Entretanto o mapa tem manchas aleatórias com valores classificados como "Muito Baixo" e "Bom". Para a coleta em dezembro de 2012, o mapa do pH apresenta, do lado esquerdo, valores que classificam como "Bom" e "Baixo" e pequenas manchas

classificadas como "Muito Baixo". Do lado direito, as classes são "Muito Baixo" e "Baixo".

Em relação à coleta de junho de 2013, a maior parte do mapa possui classificação entre "Baixo" e "Bom". Do lado esquerdo verifica-se uma pequena mancha classificada como "Muito Baixo, o que também ocorre no canto superior e inferior do lado direito, para manchas maiores. Quando comparados com os resultados da amostragem convencional, para todas as épocas e todos os lados, os valores de pH apresentaram classificação "Baixo".

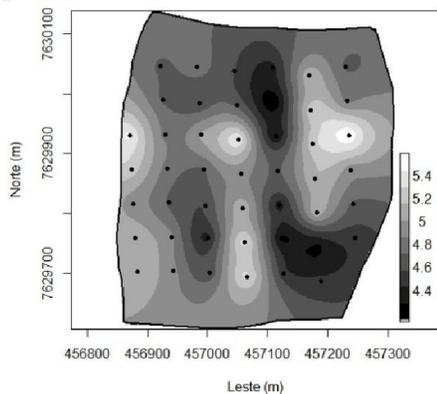
Apesar da realização da calagem de forma homogênea, observa-se que vários locais da lavoura têm acidez elevada, o que compromete a disponibilidade de nutrientes, especialmente os catiônicos. Devido ao fato de a calagem em cafeeiros em produção ser feita em superfície e sem incorporação no solo, Furtini Neto et al. (2001) recomendam a utilização de doses mais elevadas que a calculada e uso de calcário de granulometria bem fina, contando com boas precipitações de chuva no período, para permitir a descida natural da molécula de carbonato e de íons cálcio. Verifica-se, ainda, que, no lado direito superior do mapa, houve uma redução do pH, de junho de 2012 para junho de 2013. Essa acidificação pode ter sido ocasionada por: decomposição da matéria orgânica seguida por nitrificação, ou pelas próprias plantas, em função da liberação e íons H^+ ou OH^- devido ao balanço entre a absorção de cátions e ânions.

Ainda na Figura 3 encontram-se os mapas do teor de K, para as três épocas. De acordo com os dados do Quadro 1, há correlação linear entre o K em junho de 2012 e dezembro de 2012 igual a 0,6179, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013, igual a 0,4880. Em junho de 2012, no canto inferior direito e no canto superior esquerdo, a área apresenta valores classificados como "Médio". O restante da área apresenta as classificações "Bom" e "Muito Bom". Já no mapa referente a dezembro de 2012, são encontradas as classes "Bom" e "Muito Bom". Para junho de 2013, o mapa do teor de K possui as classes "Médio" e

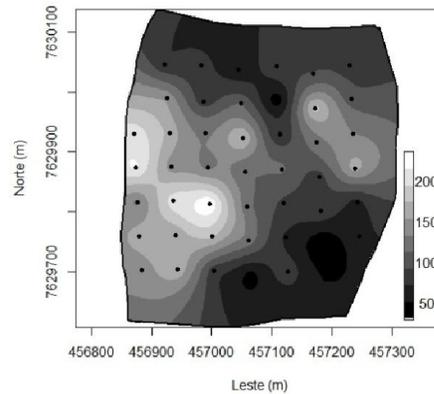
"Bom" em grande parte do mapa. Pequenas manchas do lado direito e esquerdo, próximas ao centro, possuem classificação "Muito Bom". Em relação à amostragem convencional, apenas teor de K do lado A de dezembro de 2012 foi classificado como "Muito Bom". O restante foi classificado como "Bom". Apesar de os locais dos mapas manterem sua classificação ao longo das épocas, verificam-se mudanças nos valores do teor de potássio, o que pode ser justificado por ser um elemento adsorvido fracamente pelo solo e ser facilmente perdido por lixiviação, principalmente em condições de baixa CTC efetiva (t) e baixo teor de matéria orgânica.

Figura 3 - Distribuição espacial do pH e K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13

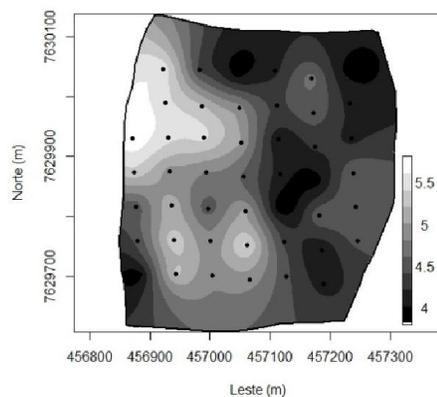
pH - Jun/12



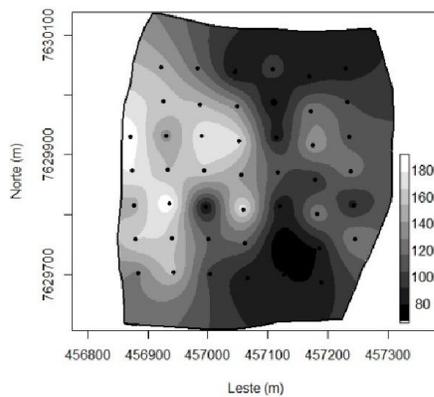
K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



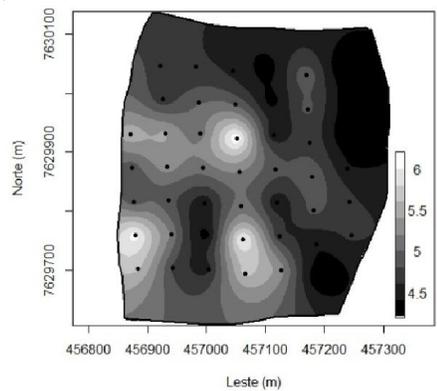
pH - Dez/12



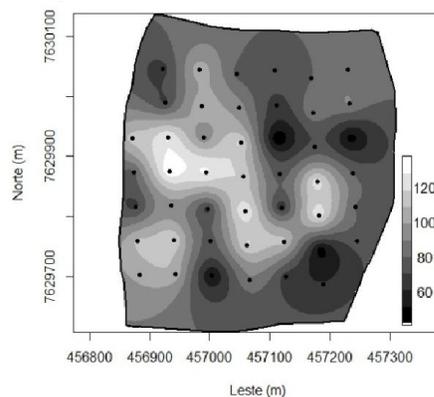
K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



pH - Jun/13



K ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



A distribuição espacial do teor de P, para as três épocas, é apresentada na Figura 4. Segundo o Quadro 1, não há correlação linear entre as épocas de amostragem para o P. Para o mapa do teor de P em junho de 2012, observa-se que a maioria do mapa pode ser classificada como "Muito Baixo" e "Baixo". Apenas no lado inferior esquerdo é possível encontrar pequenas manchas classificadas como "Médio", "Bom" e "Muito Bom".

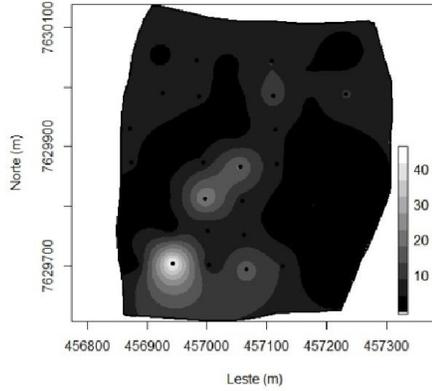
No mapa referente à coleta de dezembro de 2012, também ocorre a classificação "Muito Baixo" e "Baixo" para o teor de P, na maioria da área. Algumas pequenas manchas na parte superior esquerda e no lado direito possuem classificação entre "Médio" e "Muito Bom". Em relação ao mapa de junho de 2013, a maior parte é classificada como "Muito Baixo" e "Baixo", sendo que há manchas aleatórias classificadas como "Muito Bom". Excetuando o lado B da coleta em junho de 2012 que recebeu classificação "Bom", na amostragem convencional todos os demais lados apresentaram classificação do teor de P como sendo "Baixo". A grande quantidade de locais com teor de P classificado como baixo, mesmo com aplicação homogênea na lavoura, pode ser justificada pela elevada fixação de fósforo pelo solo, ocasionado pela elevada adsorção, uma vez que se trata de solo com presença de óxidos de ferro e alumínio, e elevada precipitação, devido a formação de compostos de baixa solubilidade em pH abaixo de 6,0 (FURTINI NETO et al., 2001), o que ocorre em toda a área em junho e dezembro de 2012, e boa parte da área em junho de 2013 (Figura 3).

Os mapas do teor de Ca estão presentes na Figura 4. Pelo Quadro 1, verifica-se que há correlação linear entre junho de 2012 e dezembro de 2012, igual a 0,4498, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013, igual a 0,5689. Em junho de 2012, existem pequenas manchas em que o teor de Ca é classificado como "Muito Baixo" e "Bom", mas a maior parte da área possui valores classificados como "Baixo" e "Médio". Para dezembro de 2012, os maiores

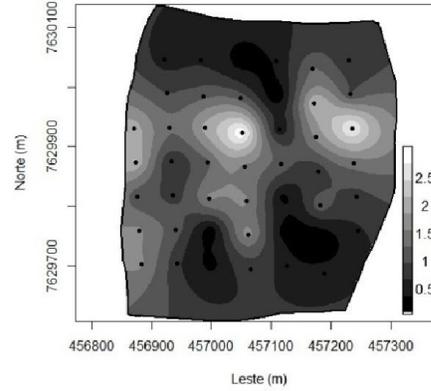
valores foram encontrados do lado direito do mapa, classificados de "Médio", "Bom" e "Muito Bom", e os menores do lado esquerdo, com classificações de "Baixo" a "Médio". Em junho de 2013, o lado esquerdo possui os maiores valores em relação ao lado direito, mas ainda existem manchas com menores valores. Neste caso, encontram-se as classes "Baixo", "Médio", "Bom" e "Muito Bom". Para a amostragem convencional, os dois lados da coleta em junho de 2012 possuem a classe "Baixo". Já para dezembro de 2012, o lado A foi classificado como "Bom" e o lado B como "Médio". Os dois lados da coleta em junho de 2013 possuem teor de Ca classificado como "Médio". Observa-se um aumento nos locais com maior teor de Ca, entre junho de 2012 e junho de 2013, em função da aplicação de calcário.

Figura 4 - Distribuição espacial do P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) e Ca($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13

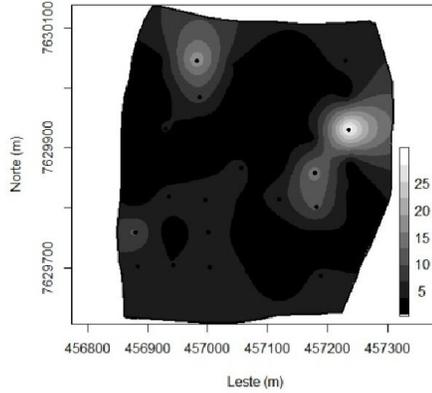
P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



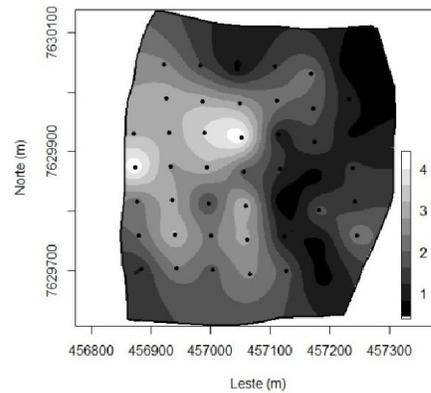
Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



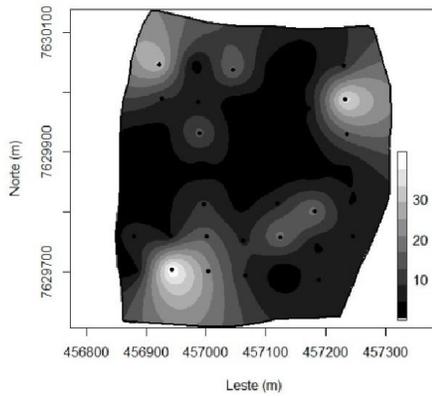
P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



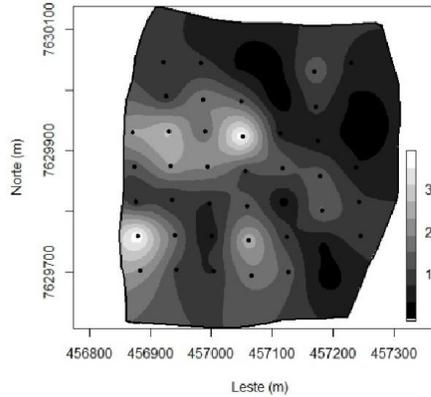
Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



Ca ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



Os mapas do teor de Mg para as três épocas avaliadas estão na Figura 5. A correlação entre o Mg de junho de 2012 e dezembro de 2012 foi de 0,3798, sendo que para dezembro de 2012 e junho de 2013 foi igual a 0,4485, como apresentado no Quadro 1. Observa-se que para junho de 2012, o teor de Mg é classificado como "Muito Baixo" e "Baixo" na maioria da área, e como "Médio" em pequenas manchas no centro da área. Para dezembro de 2012, grande parte da área é classificada como "Baixo" e "Médio", sendo que existem ainda locais em que há a classificação como "Baixo" e uma pequena mancha do lado esquerdo como "Bom". Já em junho de 2013, o teor de Mg é classificado como "Muito Baixo", "Baixo" e "Médio" para a maioria da área, sendo que também existem uma pequena mancha considerada como teor "Bom". Para a amostragem convencional, todos os lados de todas as épocas receberam a classificação de "Baixo", exceto pelo lado A da coleta de dezembro de 2012 que recebeu a classificação "Médio". Mesmo após a aplicação homogênea de calcário na área, percebe-se que não houve aumento no teor de magnésio na lavoura.

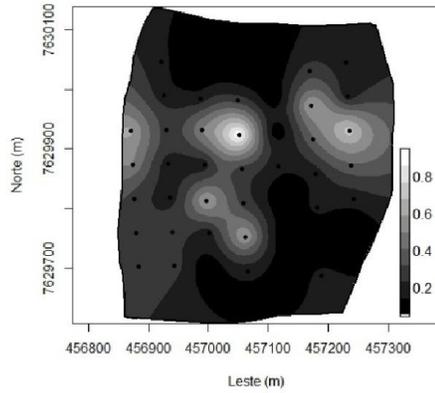
Em relação ao teor de Al, sua distribuição espacial está apresentada na Figura 5. Verifica-se, pelo Quadro 1, que apenas houve correlação linear entre os dados de dezembro de 2012 e junho de 2013, igual a 0,5721. Em junho de 2012, observa-se que a maioria da área apresenta valores que são classificados como "Muito Baixo", "Baixo" e "Médio". Algumas poucas manchas menores são classificadas como "Alta". Para dezembro de 2012, no lado esquerdo, verifica-se a predominância de valores classificados como "Muito Baixo" e "Baixo". Entretanto, verifica-se que neste lado existe uma mancha localizada na parte superior classificada como "Médio". No lado direito observa-se que ocorrem valores classificados como "Baixo" e "Médio", e uma pequena mancha classificada como "Alta". Em relação a junho de 2013, estão presentes no mapa as classificações "Muito Baixo", "Baixo", "Médio" e "Alta". Para a amostragem convencional, os lados A de junho de 2012 e 2013 receberam classificação de

200

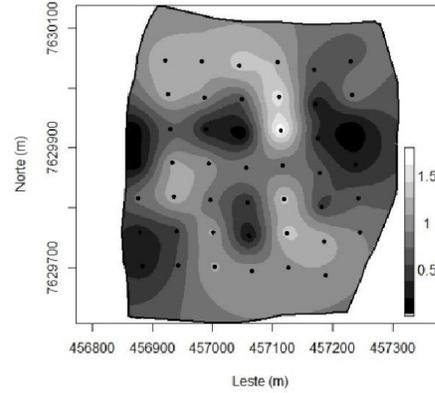
teor de AI "Médio". Já para o lado A de dezembro de 2012, a classificação foi "Muito Baixo". O restante foi classificado como "Baixo".

Figura 5 - Distribuição espacial do Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) e Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13

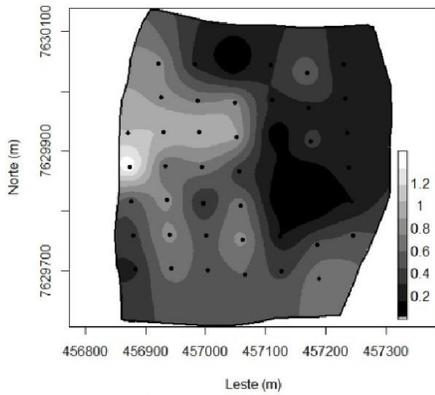
Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



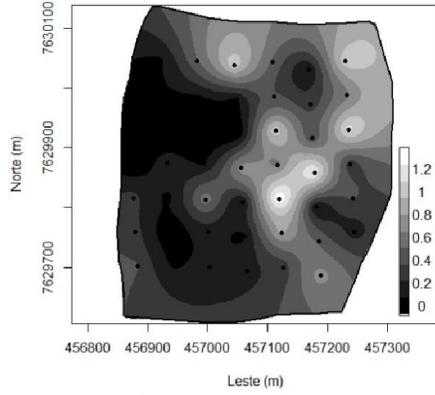
Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



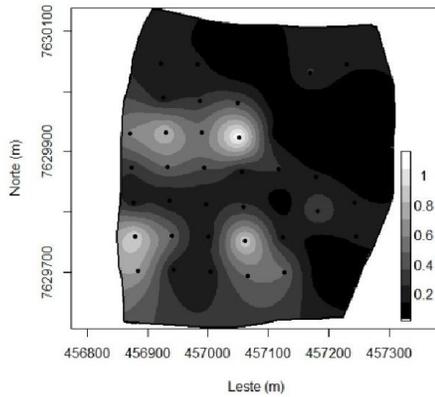
Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



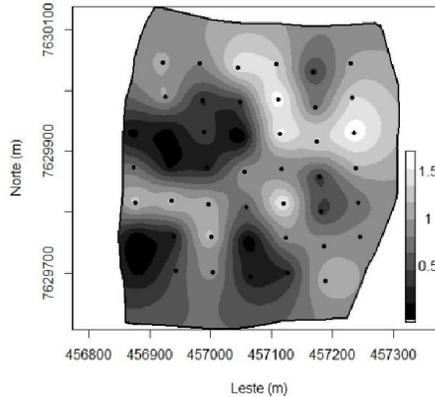
Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



Mg ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/13

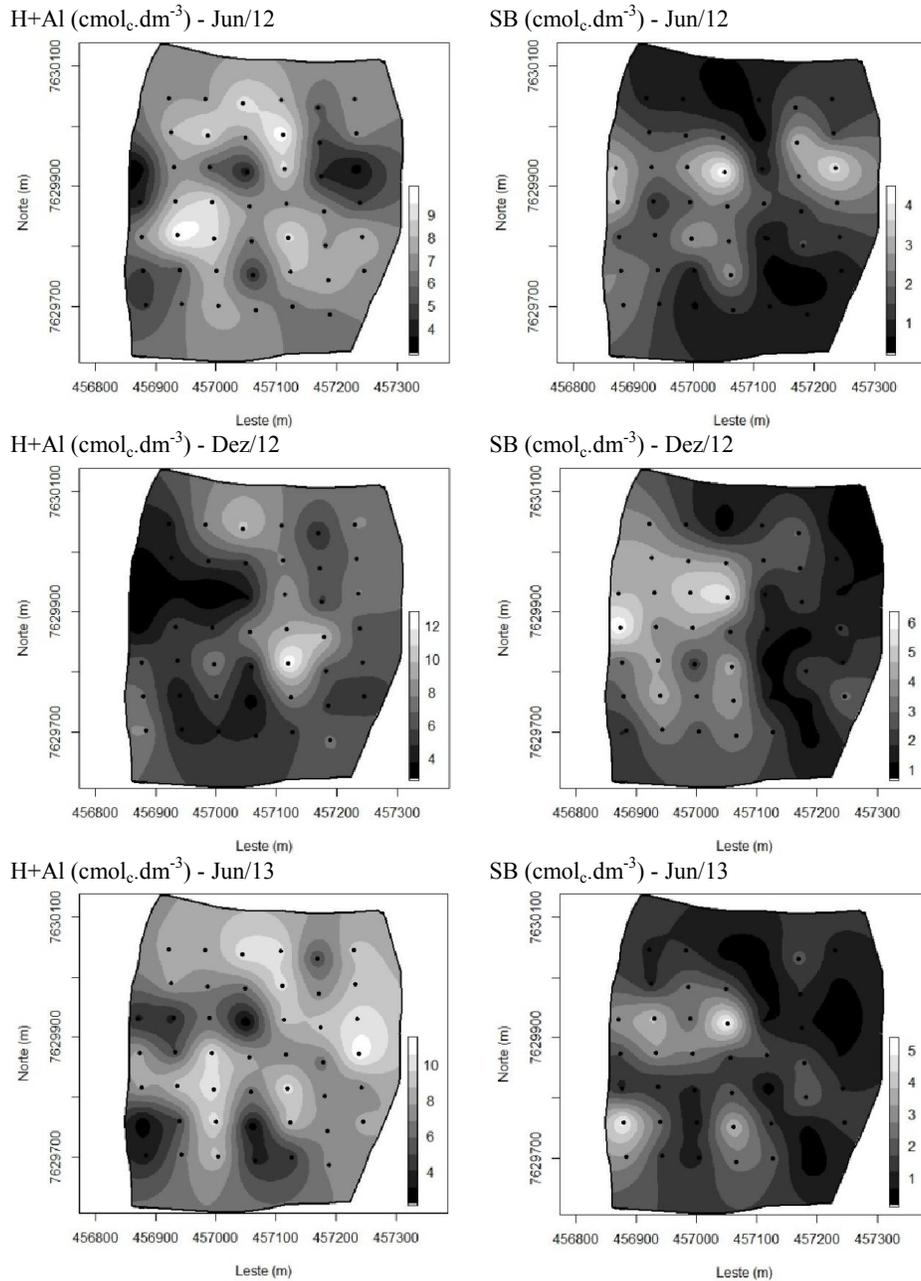


Os mapas de H+Al, para as três épocas, estão apresentados na Figura 6. Observa-se, no Quadro 1, que existe correlação linear entre junho de 2012 e dezembro de 2012, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013, igual a 0,4015 e 0,4626, respectivamente. Em junho de 2012, a maior parte da área pode ser classificada como "Alta", sendo que há pequenas manchas aleatórias classificadas como "Médio" e "Muito Alta". Para dezembro de 2012, são encontradas as classes "Médio", no lado esquerdo e em uma pequena mancha do lado direito do mapa, e "Muito Alta" para pequenas manchas localizadas no lado superior direito e na região central do mapa. O restante da área é classificado como "Alta". Já em junho de 2013, é possível observar pequenas manchas do lado esquerdo em que o H+Al é classificado como "Médio". Existem manchas aleatórias de classificação "Muito Alta", e o restante da área é classificado como "Alta". Para a amostragem convencional, todos os lados e em todas as épocas, a classificação do H+Al foi "Alta", exceto para o lado A de dezembro de 2012 que foi considerado "Médio".

A distribuição espacial da SB para as épocas de coleta encontra-se na Figura 6. Entre junho de 2012 e dezembro de 2012, verifica-se pelo Quadro 1 que a correlação linear foi de 0,4891. Já em relação a dezembro de 2012 e junho de 2013, a correlação linear foi de 0,5673. Em junho de 2012, o valor da SB é classificado em "Muito Baixo", "Baixo", "Médio" e em pequenas manchas como "Bom". Para dezembro de 2012, os maiores valores estão do lado esquerdo do mapa, classificados como "Bom" e em pequenas manchas como "Muito Bom". No lado direito são encontradas as classes "Médio" e "Baixo". Em junho de 2013, o mapa da SB apresenta no lado direito as classes "Muito Baixo" e "Baixo". Para o lado direito, as classes encontradas vão de "Muito Baixo" a "Bom". Na amostragem convencional, os dois lados da coleta em junho de 2012 receberam classificação "Baixo". Os demais foram classificados como "Médio". Os mapas

estão de acordo com a distribuição espacial dos teores de cálcio, magnésio e potássio trocáveis (Figuras 3, 4 e 5), e inversamente proporcionais ao da H+Al.

Figura 6 - Distribuição espacial do H+Al ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) e SB ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.

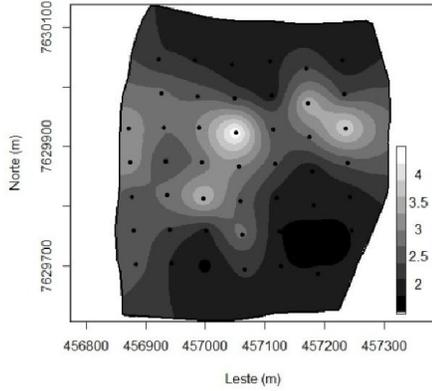


Os mapas de t estão apresentados na Figura 7. De acordo com o Quadro 1, a correlação linear entre os dados de t em junho de 2012 e dezembro de 2012 foi de 0,5335, e de dezembro de 2012 para junho de 2013 foi de 0,5308. Em junho de 2012, na maior parte da área, a t é classificado como "Médio". O restante da área tem a classe "Baixo". Para dezembro de 2012, há pequenas manchas da classe "Baixo" e "Bom", sendo o restante classificado como "Médio". Em junho de 2013, predominam na área as classes "Baixo" e "Médio", existindo ainda uma pequena mancha da classe "Bom" no lado esquerdo do mapa. Na amostragem convencional, nos dois lados da coleta de junho de 2012, a classificação da t foi "Baixo". Para os demais, foram classificados em "Médio".

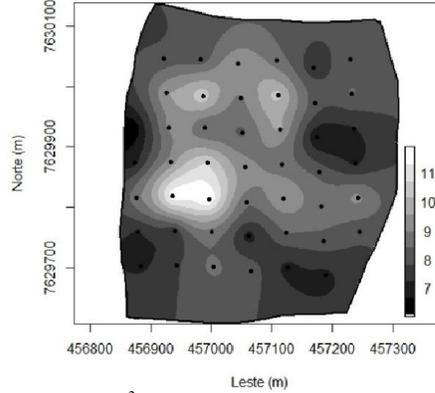
A distribuição espacial da T , para as três épocas, está presente na Figura 7. Pelo Quadro 1, verifica-se que a correlação linear entre junho de 2012 e dezembro de 2012 foi de 0,4209, e para dezembro de 2012 e junho de 2013 foi de 0,3853. Em junho de 2012, a maior parte da área é classificada como "Bom". A classe "Médio" está presente na área em manchas aleatórias. O mesmo ocorre para os mapas de dezembro de 2012 e junho de 2013. Para a amostragem convencional, o valor da T foi classificado como "Médio" para o lado B de junho de 2012, e para os dois lados da coleta em dezembro de 2012. Para o lado A de junho de 2012 e para os dois lados da coleta em junho de 2013, a classificação foi "Bom".

Figura 7 - Distribuição espacial da t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) e T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13.

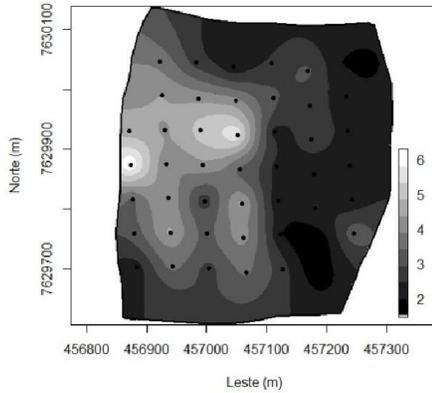
t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



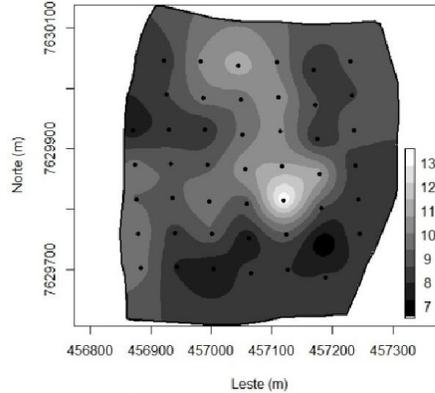
T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/12



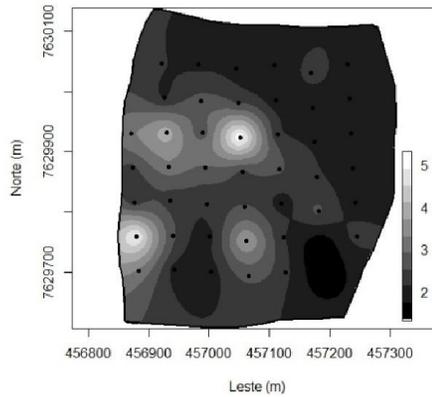
t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



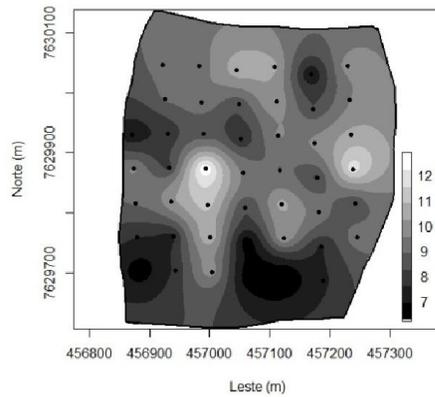
T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Dez/12



t ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



T ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) - Jun/13



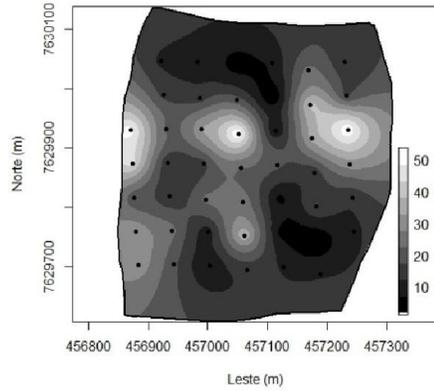
Os mapas de V(%), para todas as épocas, estão apresentados na Figura 8. Para os dados de junho de 2012 e dezembro de 2012, a correlação linear entre eles foi de 0,4635, e para dezembro de 2012 e junho de 2013, foi de 0,5218, como se observa no Quadro 1. Para junho de 2012, observa-se a presença das classes "Muito Baixo" e "Baixo" em grande parte da área, que ainda possui pequenas manchas aleatórias de classe "Médio". Para dezembro de 2012, encontram-se as classes "Muito baixo", "Baixo", "Médio" e "Bom". Em junho de 2013, predomina na área V% classificado como "Muito Baixo" e "Baixo", sendo que existem manchas pequenas das classes "Médio" e "Bom". Na amostragem convencional, o lado A da coleta de junho de 2012 foi classificado como "Muito Baixo". O Lado A da coleta em dezembro de 2012 foi classificado como "Médio". Os demais receberam a classe "Baixo". Apesar da realização das etapas de adubação e correção do solo que objetivam o aumento do pH do solo e a adição de bases no complexo de troca, verifica-se que o V% não atingiu valores superiores a 60% ("Bom"), justificado pela variabilidade espacial existente para a SB e T.

A distribuição espacial da m(%) está apresentada na Figura 8, para todas as épocas avaliadas. De acordo com os dados do Quadro 1, a correlação entre os dados de junho de 2012 e dezembro de 2012 foi de 0,3919, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013 foi de 0,5718. Em junho de 2012, a maior parte da área é classificada como "Baixo" e "Médio", porém existem ainda as classes "Muito Baixo", "Alta" e "Muito Alta" em manchas menores. Para dezembro de 2012, a maioria da região do lado esquerdo, o valor de m% é classificado como "Muito Baixo". Para o lado direito, as classes variam de "Muito Baixo" a "Alta". Para a coleta de junho de 2013, há pequenas manchas das classes "Muito Baixa" e "Muito Alta", sendo o restante da área com as classes "Baixa", "Médio" e "Alta". Os resultados da amostragem convencional demonstram que para o lado A de junho de 2012, o m% foi classificado como "Médio". Para o lado B de junho de

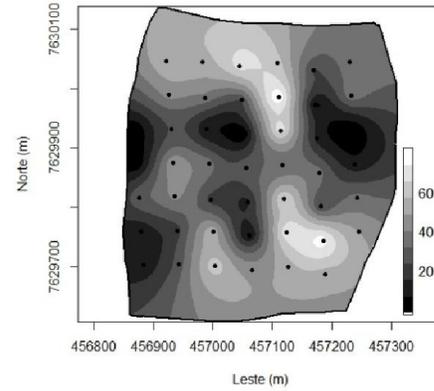
2012 e o lado A de junho de 2013, a classificação foi "Baixo". Os demais foram classificados como "Muito Baixo". Observa-se que a aplicação de calcário permitiu a diminuição dos valores de m% para dezembro de 2012, em relação a junho de 2012. A m% volta a aumentar em junho de 2013, em virtude de o Al ser o cátion mais abundante nos solos brasileiros e também devido à extração de bases pela própria lavoura cafeeira.

Figura 8 - Distribuição espacial do V (%) e m (%) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13

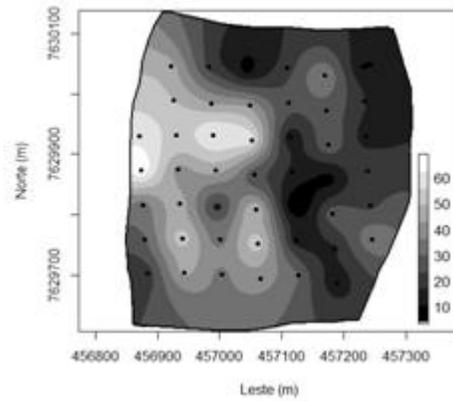
V (%) - Jun/12



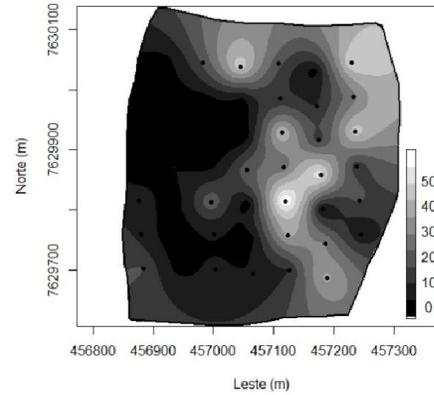
m (%) - Jun/12



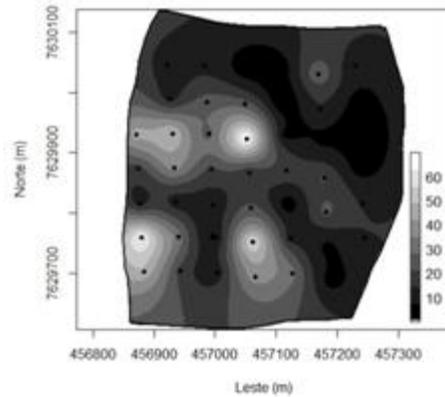
V (%) - Dez/12



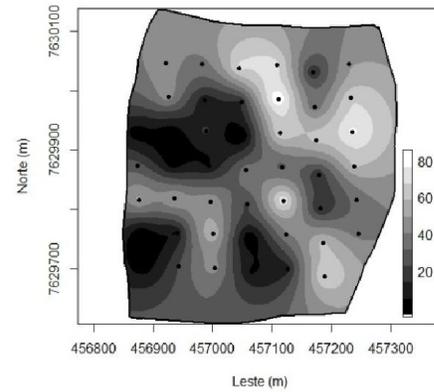
m (%) - Dez/12



V (%) - Jun/13



m (%) - Jun/13

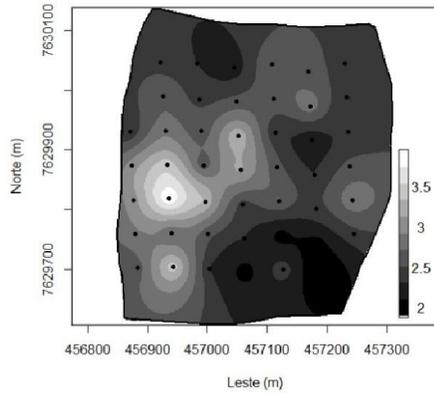


Os mapas de M.O. estão presentes na Figura 9. Pelo Quadro 1, verifica-se que não houve correlação entre nenhuma das épocas avaliadas. Observa-se que para toda a área, o teor de M.O. é considerado "Médio", para junho de 2012 e dezembro de 2012. Para junho de 2013, verifica-se que na maior parte da área é classificado como "Médio" e em uma mancha do lado direito inferior é classificado como "Bom". Para a amostragem convencional, todos os lados nas três épocas receberam a classe "Médio". A mudança dos teores de M.O. entre os mapas é justificada devido aos processos de mineralização e imobilização que ocorrem nos solos, bem como aplicações de resíduos orgânicos.

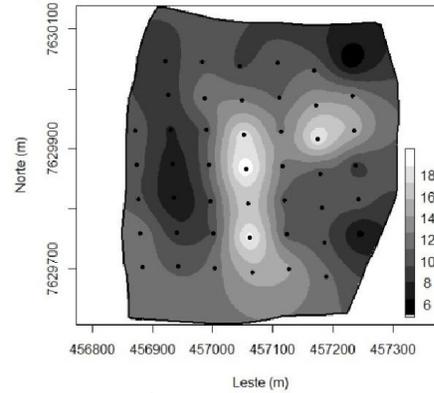
Os mapas do P-rem estão apresentados na Figura 9. Observa-se, pelos dados do Quadro 1, que houve correlação linear entre os dados de junho de 2012 e dezembro de 2012 igual a 0,4207, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013 igual a 0,3956. De acordo com CFSEMG (1999), a variável P-rem é utilizada como critério auxiliar na interpretação da disponibilidade de fósforo e enxofre, sendo dividida em classes numéricas. O mapa de dezembro de 2012 possui pequenas manchas de classe 4 a 10, sendo que o restante da área possui a classificação de 10 a 19 e de 19 a 30. Para junho de 2012 e de 2013, verifica-se que os mapas possuem P-rem classificado de 4 a 10 em manchas aleatórias, e de 10 a 19 em grande parte da área dos dois mapas. Para dezembro de 2012 e junho de 2013, pela agricultura convencional, o P-rem é classificado de 4 a 10 para o lado B, e classificado de 10 a 19 no lado A. Em junho de 2012, ambos os lados estão classificados de 10 a 19.

Figura 9 - Distribuição espacial da M.O. (dag.Kg^{-1}) e do P-rem (mg.L^{-1}) em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13

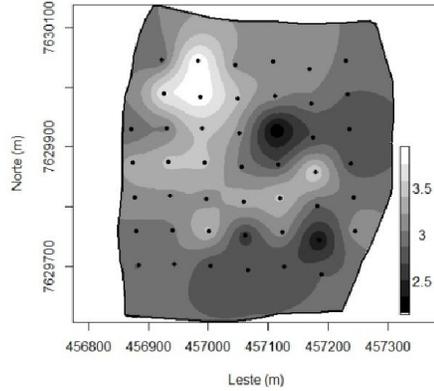
M.O. (dag.Kg^{-1}) - Jun/12



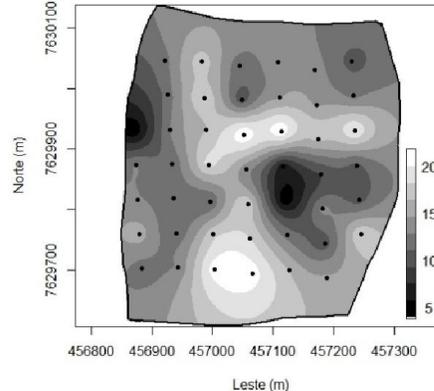
P-rem (mg.L^{-1}) - Jun/12



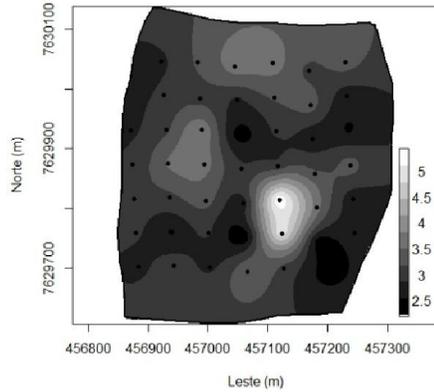
M.O. (dag.Kg^{-1}) - Dez/12



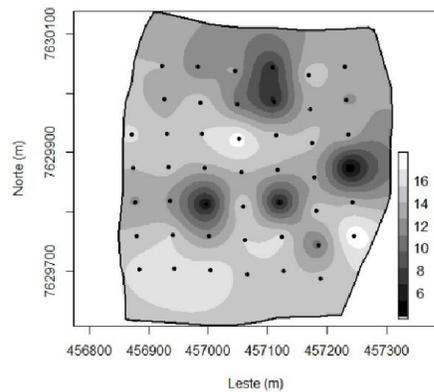
P-rem (mg.L^{-1}) - Dez/12



M.O. (dag.Kg^{-1}) - Jun/13



P-rem (mg.L^{-1}) - Jun/13



3.3.2 Análise foliar

Os mapas temáticos das variáveis da análise da nutrição foliar estão apresentados nas Figuras 10 a 12. Da mesma forma que para a fertilidade do solo, foi utilizada a Tabela 10, que tem a classificação dos valores de referência dos resultados da nutrição foliar, para permitir a comparação visual entre os resultados dos dois tipos de amostragem.

No Quadro 2 observam-se os coeficientes de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, de uma mesma variável para as diferentes épocas de amostragem. Apenas o P (%) e o Ca (%) apresentaram correlações significativas.

Quadro 2 - Coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, para as variáveis de fertilidade do solo em diferentes épocas de amostragem

		Dez/12			Dez/12
N (%)	Jun/12	Ns	Ca (%)	Jun/12	-0,4076
	Jun/13	Ns		Jun/13	0,4884
P (%)	Jun/12	0,5995	Mg (%)	Jun/12	ns
	Jun/13	0,5805		Jun/13	ns
K (%)	Jun/12	Ns	S (%)	Jun/12	ns
	Jun/13	Ns		Jun/13	ns

ns - não significativo.

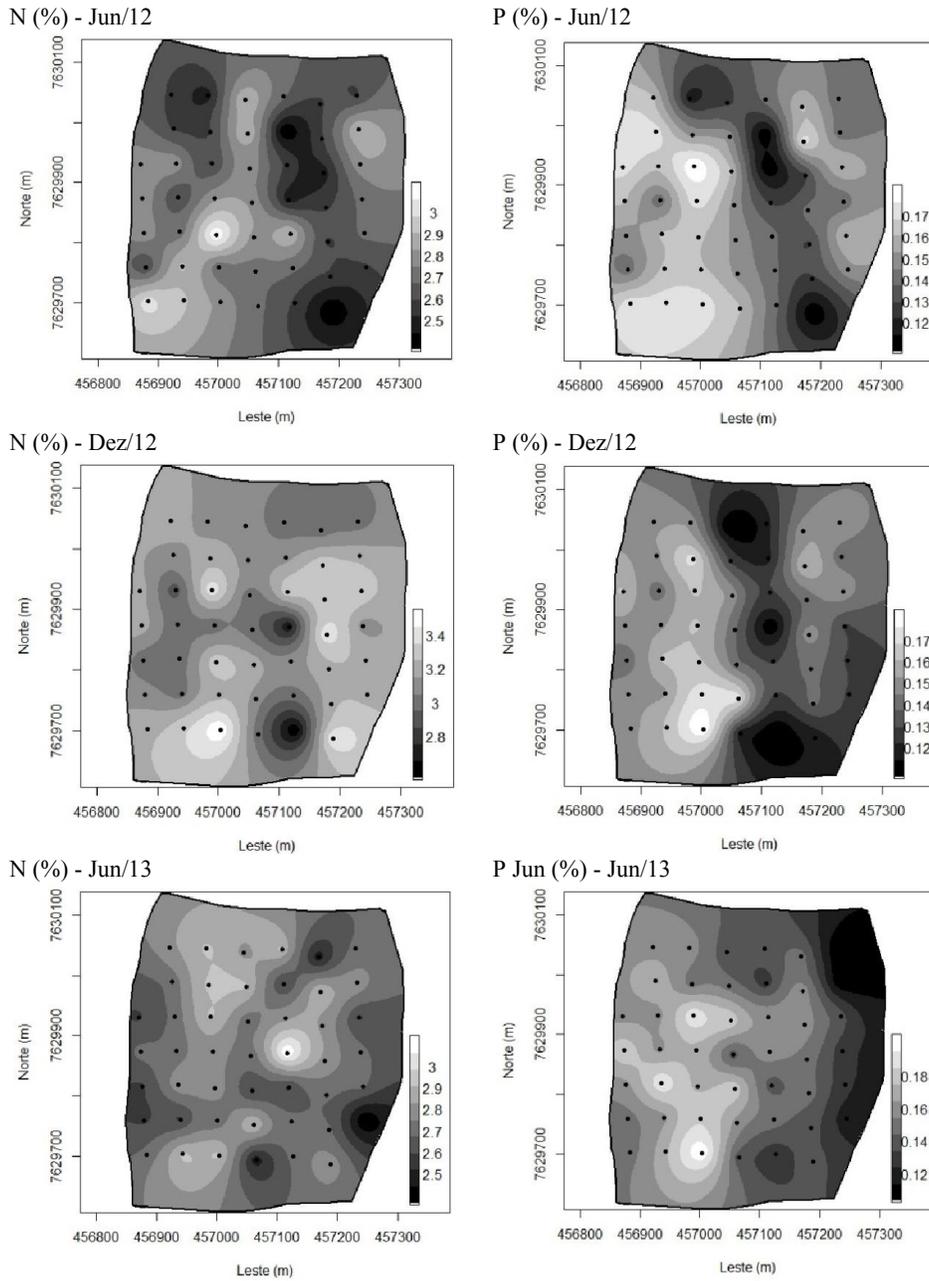
Os mapas do teor de N encontram-se na Figura 10, para as três épocas avaliadas. Na maior parte da área os valores são classificados como "Limiar", para a coleta de junho de 2012. Existem pequenas manchas que são classificadas como "Deficiente" e "Adequada". Para dezembro de 2012, há pequenas manchas, na região central e inferior do lado direito, da classe "Limiar", sendo o restante da área classificada como "Adequada". Em relação à coleta de junho de 2013, o teor de N é classificado como "Limiar" na maioria da área. Contudo, existem pequenas manchas da classe "Deficiente" e "Adequada". Os resultados

da amostragem convencional indicam que os dois lados da coleta em dezembro de 2012 são classificados como "Adequado". Os demais lados, para as outras épocas, foram classificados como "Limiar".

A identificação de locais com diferentes classes é importante, uma vez que a adubação nitrogenada é feita em função da produtividade esperada (sacas/ha) e da classe do teor foliar. Em relação ao teor de N foliar, recomenda-se a utilização de medidores de concentração de clorofila digitais, que possuem correlação com o teor de nitrogênio foliar, conforme comprovado por Godoy et al. (2008) e Torres Netto et al. (2005). Para cafeicultura de precisão, estes equipamentos ainda podem ser utilizados em conjunto com um receptor GPS, resultando em resultados rápidos, confiáveis e de fácil processamento.

Ainda na Figura 10 estão presentes os mapas do teor de P. No Quadro 2 observa-se que a correlação entre junho de 2012 e dezembro de 2012 foi igual a 0,5995, e entre dezembro de 2012 e junho de 2013 igual a 0,5805. Para junho e dezembro de 2012, a maior parte da área é classificada como "Adequada", com pequenas manchas da classe "Limiar". Existem ainda regiões em que os valores do teor de P são superiores aos das classes "Adequada". Já para junho de 2013, observa-se do lado direito manchas da classe "Limiar", sendo o restante da área com valores de teor de P considerados "Adequados" e superiores a esta classe. A amostragem convencional indica que o teor de P é classificado como "Adequado" para os dois lados da coleta de dezembro de 2012 e para os lados B de junho de 2012 e junho de 2013. Os demais apresentaram valores acima da classe "Adequada".

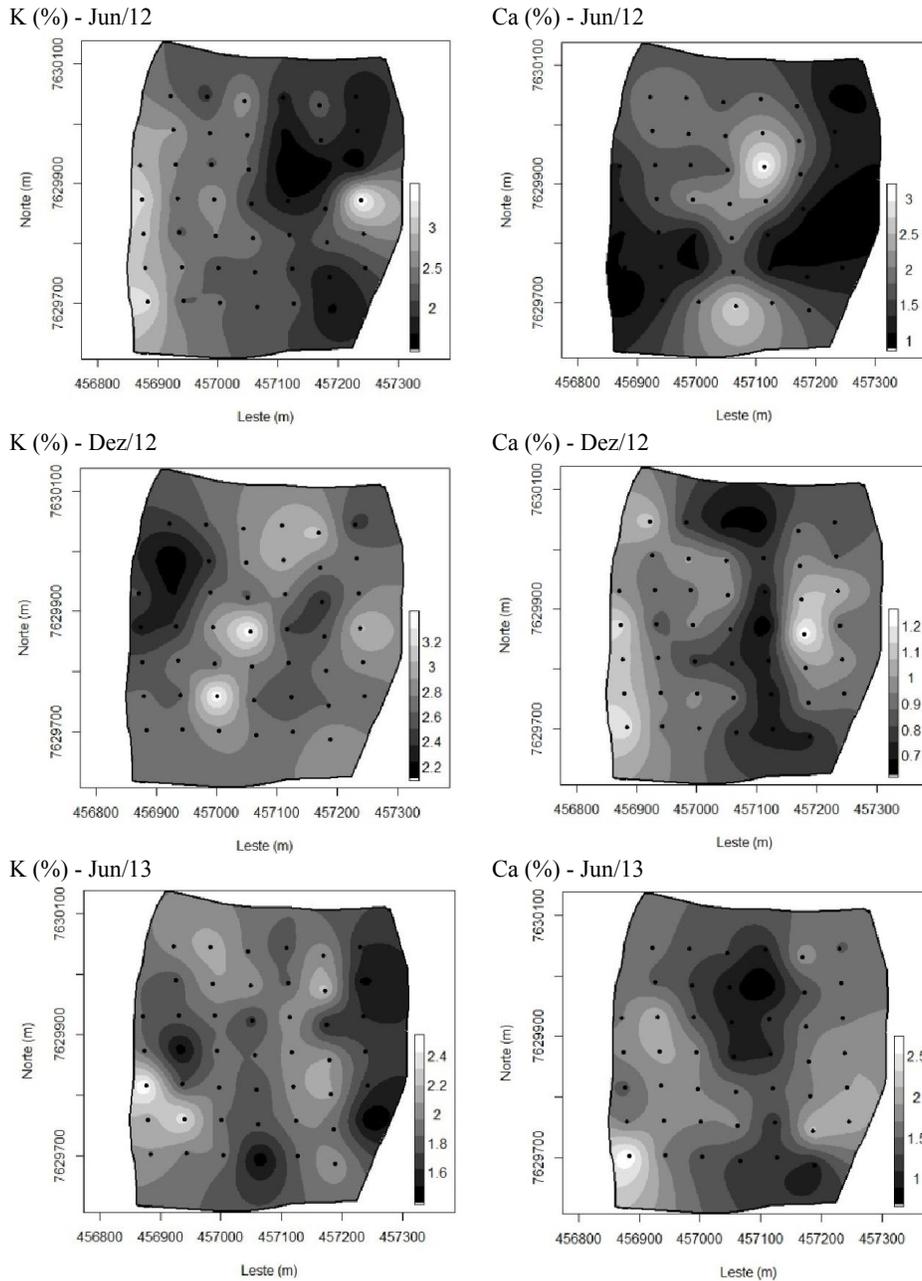
Figura 10 - Distribuição espacial do teor de N (%) e teor de P (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13



A distribuição espacial do teor de K está apresentada na Figura 11. Para junho de 2012, há manchas do lado direito das classes "Limiar" e "Adequada". Para o restante da área, há valores superiores que os da classe "Adequada". Para dezembro de 2012, existe uma pequena mancha do lado esquerdo superior classificada como "Adequada". O restante da área possui valores superiores a essa classe. Em junho de 2013, a maioria da área apresenta teor de K "Adequado". Entretanto, existem pequenas manchas da classe "Limiar" e de valores superiores à classe "Adequada". Para a amostragem convencional, os resultados indicam que os lados de dezembro de 2012 possuem valores acima da classe "Adequada". Os demais lados, das outras duas épocas, apresentam valores da classe "Adequada". A variação entre os mapas pode ser justificada pela disponibilidade de K, que, de acordo com os mapas da Figura 3, não eram uniformes, possivelmente em virtude da alta lixiviação.

Os mapas do teor de Ca também estão presentes na Figura 11. Pelo Quadro 2, verifica-se que entre junho de 2012 e dezembro de 2012, a correlação entre os dados foi de -0,4076. Já entre dezembro de 2012 e junho de 2013, foi igual a 0,4884. Em junho de 2012 e junho de 2013, existem manchas classificadas como "Adequadas". O restante da área tem valores maiores que os dessa classe. Para dezembro de 2012, a região central possui manchas classificadas como "Limiar", e o restante da área como "Adequada". Em relação à amostragem convencional, observa-se que o lado A de junho de 2012 e os dois lados de junho de 2013 recebem a classificação "Adequada". Já os lados de dezembro de 2012, são classificados como "Limiar". O lado B de junho de 2012 tem valor superior ao do intervalo da classe "Adequada".

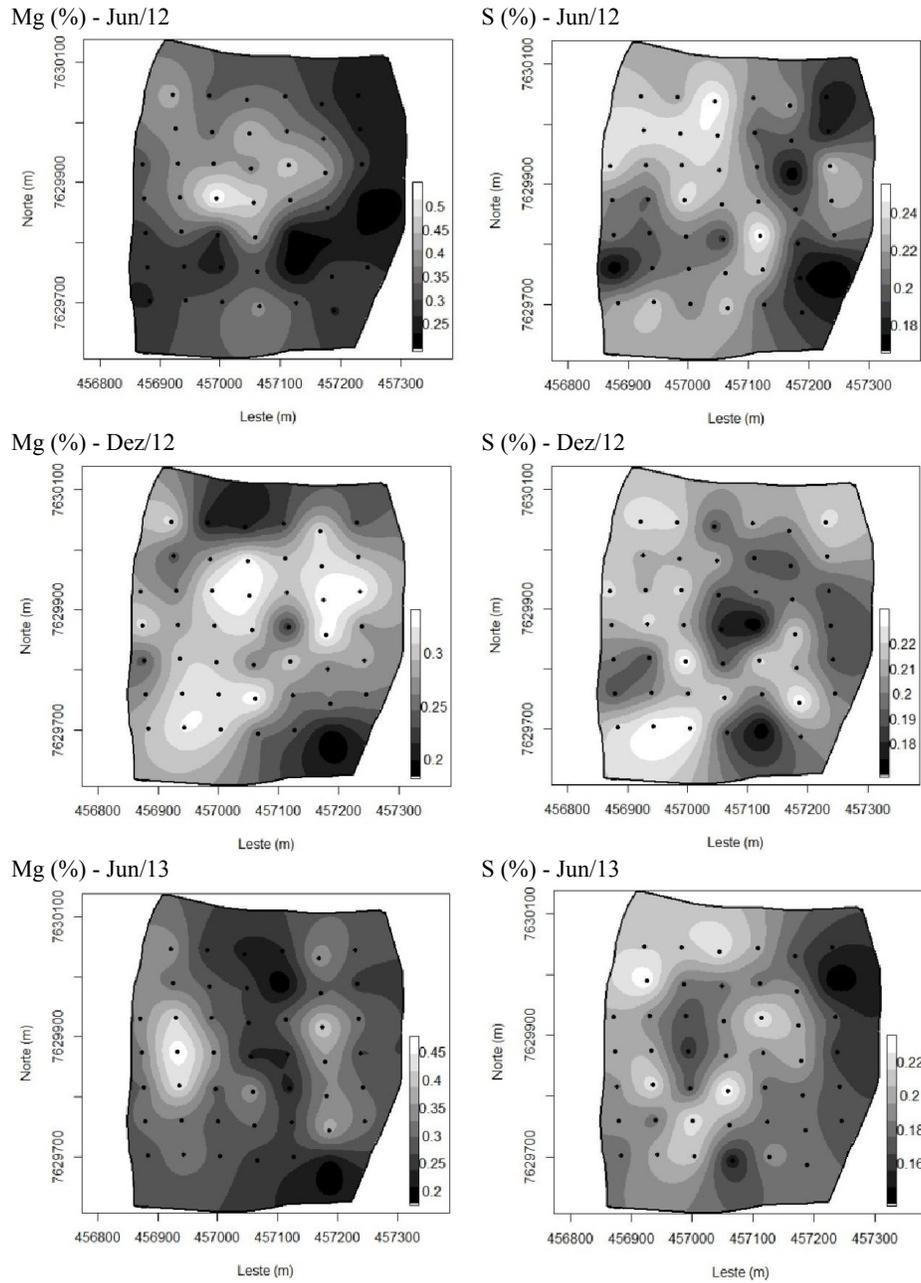
Figura 11 - Distribuição espacial do teor de K (%) e teor de Ca (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13



Os mapas do teor de Mg, para as três épocas, estão apresentados na Figura 12. Observa-se que, em junho de 2012, a maioria da área é classificada como "Limiar", lado direito do mapa, e "Adequada". Uma pequena mancha na região central apresenta valores superiores ao da faixa "Adequada". Para dezembro de 2012, existe uma mancha do lado inferior direito considerada "Deficiente". O restante da área é classificado como "Limiar". Em relação ao teor de Mg para junho de 2013, observa-se que a área tem as classes "Limiar" e "Adequada". Para a amostragem convencional, os resultados demonstram que todos os lados, para as épocas avaliadas, foram classificados como "Limiar, exceto o lado A de junho de 2012, que foi classificado como "Adequado". É possível ver que os mapas do teor de Ca são semelhantes aos do teor de Mg.

Os mapas do teor de S também se encontram na Figura 12, para as épocas avaliadas. Para junho de 2012 e dezembro de 2012, ocorre a classe "Adequada" em algumas manchas da área. O restante da área apresenta valores maiores que o intervalo dessa classe. Em relação a junho de 2013, há manchas da classe "Limiar", lado direito superior, "Adequada" e com valores superiores ao da faixa desta última. Para a amostragem convencional, os lados A de junho de 2012, B de dezembro de 2012 e B de junho de 2013, são classificados como "Adequados". O lado A de junho de 2013 é classificado como "Limiar". Os demais apresentam valores maiores que a faixa "Adequada".

Figura 12 - Distribuição espacial do teor de Mg (%) e teor de S (%), obtidos por meio de análise foliar, em três épocas: Jun/12; Dez/12; e Jun/13



3.3.3 Produtividade do café

Com a finalidade de aumentar a eficiência dos sistemas produtivos, mapas de produtividades não devem ser utilizados de forma exclusiva, uma vez que existem outros fatores que influenciam a produtividade (BRASIL, 2013). Mapas de produtividade podem ser utilizados como primeiro passo na identificação de locais em que há limitação para o desenvolvimento da lavoura, quando comparados com mapas de variáveis do sistema solo-planta-atmosfera. Além disso, servem como ferramenta para o gerenciamento da operação de colheita, mecanizada ou manual, e previsão de safra, conforme descrito em Ferraz et al. (2012).

A distribuição espacial da produtividade do cafeeiro, para 2012 e 2013, é apresentada na Figura 13. Na amostragem convencional, a produtividade em 2012 para o lado A foi de 6,15 L.planta⁻¹ e para o lado B foi de 7,10 L.planta⁻¹. Já em 2013, o lado A apresentou produtividade igual a 10,35 L.planta⁻¹ e o lado B igual a 13,43 L.planta⁻¹. Observando os mapas, para ambos os períodos, verifica-se que existem locais com valores muito distintos em relação à média apresentada pela amostragem convencional.

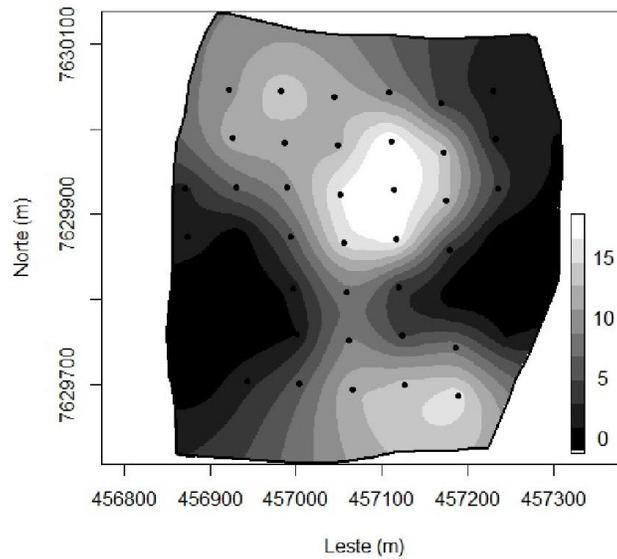
Comparando-se ambos os mapas, é interessante observar o efeito da bienalidade da produtividade, uma vez que regiões de elevada produtividade em 2012 coincidiram com regiões de baixa produtividade em 2013. Verificou-se, pela Tabela 21, uma correlação igual a -0,6950 entre as produtividades de 2012 e de 2013. A bienalidade da produtividade é uma característica fisiológica do ciclo de desenvolvimento do cafeeiro, que resulta em elevadas produtividades a cada dois anos. Alves (2006) também verificou dependência espacial da produtividade do cafeeiro com bienalidade, para as safras de 2005 e 2006.

É possível que esta variação na produtividade para os anos avaliados esteja relacionada com fatores como: bienalidade e fatores climáticos (CAMARGO; CAMARGO, 2001; CARVALHO et al., 2004); fertilidade do

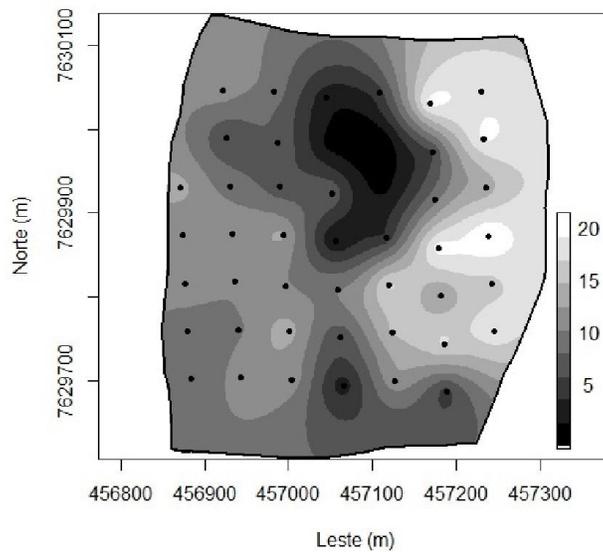
solo e nutrição foliar (CORRÊA et al., 2001) e; ocorrência de pragas e doenças (FERREIRA et al., 2003; SANTOS et al., 2008), entre outros.

Figura 13 - Distribuição espacial da produtividade (L/planta) do café em 2012 e 2013

Produtividade café (L/planta) 2012



Produtividade café (L/planta) 2013



De acordo com os dados da Tabela 21, para a produtividade do cafeeiro no ano de 2012 e as variáveis da fertilidade do solo e nutrição foliar em junho de 2012, após a aplicação da análise de correlação de Pearson, verificou-se que houve correlação apenas para as variáveis: fósforo remanescente; nitrogênio foliar; cálcio foliar; e magnésio foliar. Para 2013, houve correlação significativa em relação à produtividade apenas para o cálcio foliar em junho de 2013.

Tabela 19 - Coeficientes de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade, das variáveis de junho de 2012 e de 2013 que apresentaram correlação significativa com a produtividade do cafeeiro para os anos de 2012 e 2013

Época de coleta	Variável	Produtividade do cafeeiro	
		2012	2013
jun/12	Produtividade	1	-0,6950
	P-rem	0,4795	-
	N (%)	-0,4248	-
	Ca (%)	0,8058	-
	Mg (%)	0,5994	-
jun/13	Ca (%)	-	0,5790

Em relação à produtividade do cafeeiro em 2012, o P-rem apresentou coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,4795. Comparando-se visualmente, constata-se que os mapas apresentam alguns locais em que há relações entre os valores apresentados pelas variáveis. Verifica-se que os locais com menor teor de P-rem (manchas de coloração azul) coincidem com locais em que a produtividade do cafeeiro é menor (manchas avermelhadas). Percebe-se que os locais em que são encontrados os maiores valores de P-rem (representados no mapa por manchas avermelhadas) encontram-se na região central do mapa, a qual tem valores de produtividade considerados médios a elevados.

No caso do N (%), o coeficiente de correlação com a produtividade em 2012 foi igual a -0,4248. Observa-se que os locais que apresentam maior teor de nitrogênio foliar (manchas verdes e brancas) encontram-se nos locais em que a produtividade apresenta os menores valores (cores avermelhadas). Os menores valores do nitrogênio foliar (manchas pretas) coincidem com alguns locais em que a produtividade foi maior (manchas esverdeadas), como o lado superior esquerdo, inferior direito, e uma mancha na parte superior direita.

Para o Ca (%), observa-se que o coeficiente de correlação foi igual a 0,8058, quando em relação com a produtividade do cafeeiro em 2012. Visualmente, verifica-se claramente que os locais com maiores valores de produtividade (coloração esverdeada) coincidem com os locais com maiores valores de cálcio foliar (coloração rosa), o que também é válido para os menores valores das variáveis. Resultado semelhante também foi observado no caso do Mg (%), em que a correlação com a produtividade em 2012 foi de 0,5994.

Comparando-se visualmente os mapas da produtividade em 2013 e o Ca(%), nota-se que os locais em que a produtividade foi menor coincidem com locais em que o teor de Cálcio foliar foi menor.

Uma alternativa que pode ser explorada em função da relação existente entre a produtividade do cafeeiro e do teor foliar de cálcio é o uso da co-krigagem. Andriotti (2003) afirma que uma vez que exista a dependência espacial para cada uma das variáveis, e que também exista dependência espacial entre as variáveis, então é possível utilizar a co-krigagem para estimar valores. Dessa forma, em futuras amostragens, com um menor número de pontos amostrais em relação ao teor foliar de cálcio, seria possível a criação de mapas da produtividade do cafeeiro. A vantagem está relacionada com a facilidade e a rapidez para retirar amostras foliares em relação à produtividade. O uso de teor foliar como variável auxiliar na estimativa da produção já foi relatado por Vieira et al. (2010), que utilizaram o teor de P para estimar a produção de grãos de soja.

3.3.4 Parecer entre a cafeicultura de precisão e a amostragem convencional

Com base nos resultados obtidos, sob as condições avaliadas na área experimental, após a comparação entre todos os mapas temáticos e os resultados da amostragem convencional, verificou-se que a cafeicultura de precisão foi mais eficiente na identificação de locais da lavoura com déficit ou com excesso das variáveis de fertilidade do solo e nutrição foliar, bem como locais de baixa e elevada produtividade. Caso alguma estratégia de manejo fosse utilizada com base nos resultados da amostragem convencional, ela seria feita em excesso em algumas regiões e de forma insuficiente em outras, em comparação com a cafeicultura de precisão. Dessa forma, verifica-se a importância da adoção da cafeicultura de precisão para o manejo das lavouras, em busca de uma maior eficiência do sistema produtivo.

A comparação visual dos mapas temáticos para as diferentes variáveis, em épocas diferentes, bem como a comparação destes mapas com a agricultura convencional, permitiu conhecer o comportamento das variáveis ao longo do período avaliado, bem como verificar as diferenças com o manejo usual adotado. A comparação visual entre diferentes mapas e entre valores de referência também foi utilizada por Vieira et al. (2010), na avaliação dos teores foliares e produtividade da soja, em dois anos, em Campinas, Estado de São Paulo. Os autores constataram que a aplicação da agricultura de precisão identificou melhor as variações existentes na lavoura de soja, em relação à agricultura convencional. Esta conclusão também foi encontrada nos trabalhos de Oliveira et al. (2008, 2010), nos quais o café conilon, no Estado do Espírito Santo, a amostragem de acordo com a cafeicultura de precisão também se mostrou a mais indicada.

4 CONCLUSÕES

Foi possível identificar a variabilidade espacial e temporal de todas as variáveis avaliadas em uma área de 22 hectares e adubada de forma homogênea, possibilitando visualizar a variabilidade existente por meio de mapas de isocores.

Verificou-se que, para as variáveis resultantes da análise da fertilidade do solo e da nutrição foliar, existem diferenças quanto às classes de teores encontradas na amostragem convencional e na cafeicultura de precisão. Observou-se que, na cafeicultura de precisão, encontram-se classes não identificadas pela amostragem convencional.

Observou-se, para 2012, relação espacial entre a produtividade com o fósforo remanescente e os teores foliares de nitrogênio, cálcio e magnésio. Para o ano de 2013, verificou-se esta relação somente para o cálcio foliar.

Foi constatada a importância da cafeicultura de precisão no gerenciamento da lavoura, uma vez que ela permitiu identificar locais que apresentam condições limitantes ao desenvolvimento das plantas e que necessitam de operações de manejo de solo e planta.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C. Cafeicultura de precisão. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 189-223.
- ALVES, M. C. **Geoestatística e Sistemas 'Fuzzy' na proteção de plantas**. 2006. 186 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.
- BALASTREIRE, L. A. et al. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade de uma cultura de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Brasília, 2013. 36 p.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CARVALHO, J. G. et al. Sintomas de desordens nutricionais em cafeeiro. In: GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas**. Lavras: UFLA, 2010. p. 69-101.
- CARVALHO, L. G. et al. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, 2004.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café terceiro levantamento da safra de 2015**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2015. 63 p.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.

CORRÊA, J. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do Sul de Minas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1279-1286, nov./dez. 2001.

FERRAZ, G. A. S. et al. Variabilidade espacial da dose de P_2O_5 e K_2O para adubação diferenciada e convencional em lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 346-356, jul./set. 2015.

_____. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012.

FERREIRA, A. J. et al. Bioecologia da broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera, Scolyidae), no agrossistema cafeeiro do cerrado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 2, p. 422-431, mar./abr. 2003.

FUNDAÇÃO PROCAFÉ. **Padrões referenciais médios para avaliação de resultados de análise de solos e análise foliar na cultura do café**. Varginha, 2015. Disponível em: <<http://www.fundacaoprocafe.com.br/laboratorio/solos-e-folhas/padroes-referenciais>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GODOY, L. J. G. et al. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 217-226, 2008.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, mar./abr. 2005.

LIMA, J. S. S. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade do cafeeiro canephora. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 400-407, jul./set. 2014.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**: colheitas econômicas máximas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1993. 210 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Fósforo, 1997. 238 p.

MATIELLO, J. B. **Gosto do meu cafezal**. Rio de Janeiro: Globo, 1997. 139 p.

MILLS, H. A.; JONES JUNIOR, J. B. **Plant analysis handbook II**. 2nd ed. Athens: Micro-Macro, 1996. 422 p.

OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, jan./mar. 2008.

_____. Variabilidade espacial do estado nutricional do cafeeiro canephora visando o manejo localizado. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 190-196, set./dez. 2010.

QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 109-157.

REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. **Plant analysis: an interpretation manual**. Melbourne: Inkata, 1988. 218 p.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, Dec. 2005.

SANTOS, F. S. et al. Adubação orgânica, nutrição e progresso de cercosporiose e ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 7, p. 783-791, jul. 2008.

SCHUELLER, J. K. O estudo da arte da agricultura de precisão nos EUA. In: SIMPÓSIO SOBRE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2000. p. 8-16.

SILVA, F. M. da; ALVES, M. C. Cafeicultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Cafeicultura de precisão**. Lavras: UFLA, 2013. p. 17-24.

SILVA, F. M. da et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

_____. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.

TORRES NETTO, A. et al. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientific Horticulture**, Kent, v. 104, n. 2, p. 199-209, Mar. 2005.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-93, 1985.

VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 1503-1514, set./out. 2010.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

WILLSON, K. C. Mineral nutrition and fertilizer needs. In: CLIFORD, N. N.; WILLSON, K. C. (Ed.). **Coffee botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 135-156.