

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO ARROZ DE
TERRAS ALTAS IRRIGADO COM ATRIBUTOS
QUÍMICOS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**

FLÁVIO CARLOS DALCHIAVON
Engenheiro Agrônomo

ILHA SOLTEIRA
ESTADO DE SÃO PAULO
NOVEMBRO - 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

**ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO ARROZ DE TERRAS
ALTAS IRRIGADO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO SOB
PLANTIO DIRETO**

FLÁVIO CARLOS DALCHIAVON
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP - Campus de Ilha
Solteira para a obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA,
especialidade: Sistemas de Produção.

Ilha Solteira–SP
Novembro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

D138a

Dalchiavon, Flávio Carlos.

Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com
atributos químicos do solo sob plantio direto / Flávio Carlos Dalchiavon.
Ilha Solteira : [s.n.], 2010
113 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção,
2010

Orientador: Morel de Passos e Carvalho

1. Agricultura de precisão. 2. Solos - Fertilidade . 3. Oryza.
4. Plantio direto.

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte”



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE DO ARROZ DE TERRAS ALTAS IRRIGADO COM
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO

AUTOR: FLÁVIO CARLOS DALCHIAVON

ORIENTADOR: Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA ,
Área: SISTEMAS DE PRODUÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK
Departamento de Recursos Naturais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Data da realização: 30 de novembro de 2010.

DEDICO ESTA CONQUISTA À
MINHA FAMÍLIA, MEU PAI **HILÁRIO
DALCHIAVÓN**, MINHA MÃE **LOURDES
PASQUALETTO DALCHIAVÓN** E AOS
MEUS IRMÃOS. ESTES QUE FORAM, E
SEMPRE SERÃO, MEU ALICERCE POR
ESSA CAMINHADA EM PROL DOS
ESCOPOS SUPERIORES DA VIDA,
ORIENTANDO-ME AO SUCESSO
PESSOAL/PROFISSIONAL E
ENSINANDO-ME OS VALORES E
PRINCÍPIOS MORAIS QUE ENALTECEM
O HOMEM.

DEDICO

OFEREÇO TODOS OS MÉRITOS
DESTA VITÓRIA AO MEU AMOR
GRACIELE NEVES, QUE COM SUA
IMENSURÁVEL PACIÊNCIA DE
ESPERA, ME TRANSMITIU
SEGURANÇA, MOSTRANDO A
IMPORTÂNCIA DA PERSISTÊNCIA,
DEDICAÇÃO E RESPONSABILIDADE.

OFEREÇO

AGRADEÇO...

À **DEUS**, QUE NOS MOMENTOS DIFÍCEIS ME ESTENDIA AS MÃOS, TRANSMITINDO CONFORTO, PROTEÇÃO, SEGURANÇA E PAZ;

À MINHA FAMÍLIA, SEMPRE PRESENTE NESSA DÁDIVA DE DEUS CHAMADA “VIDA”;

À GRACIELE NEVES, PELOS MOMENTOS DE CARINHO, AFETO, ACONCHEGO, AMOR E PAZ;

AO ORIENTADOR PROFESSOR DR. MOREL DE PASSOS E CARVALHO, PELA SINCERA AMIZADE ASSIM COMO PELAS INÚMERAS TRANSFERÊNCIAS DE CONHECIMENTOS E EXPERIÊNCIAS;

À COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR – CAPES, PELA CONCESSÃO DA BOLSA DE ESTUDO;

AOS DEMAIS PROFESSORES DR. ALCEBÍADES RIBEIRO CAMPOS, ÉLCIO HIROYOSHI YANO, FRANCISCO MAXIMINO FERNANDES, MARCELO ANDREOTTI, ORIVALDO ARF E MARLENE CRISTINA ALVES, PELAS VALIOSAS CONTRIBUIÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO;

AOS TÉCNICOS LABORATORIAIS CARLOS ARAÚJO DA SILVA E VALDEVINO DOS SANTOS, PELO AUXÍLIO NAS ATIVIDADES DE CAMPO E/OU LABORATORIAIS;

A TODOS OS FUNCIONÁRIOS DA FAZENDA, EM NOME DE ALVINO DA SILVA E MANOEL FERNANDO ROCHA BONFIM, PELO AUXÍLIO NA IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO;

AO AMIGO EDMUNDO DA PAZ CABRAL, QUE ME ESTIMULOU A PERSISTIR NOS ESTUDOS;

AOS AMIGOS ADMAR JUNIOR COLETTI, AMILTON FERREIRA DA SILVA, GUSTAVO CAIONE, JEAN FERNANDO, MÁILA TERRA GIOIA, ONÃ DA SILVA FREDDI E RAFAEL MONTANARI, PELO AUXÍLIO NAS ATIVIDADES;

E A TODOS QUE NÃO FORAM CITADOS, MAS QUE DE ALGUMA FORMA FORAM IMPORTANTES PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO;

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS, E VÓS DIGO, SEM VOSSAS PRECIOSAS CONTRIBUIÇÕES, MAIS DIFÍCIL SERIA A SUPERAÇÃO DESSE IMPORTANTE DEGRAU DA MINHA VIDA.

MUITO OBRIGADO!!!

Educar e educar-se, na prática da liberdade, não é estender algo desde a "sede do saber", até a "sede da ignorância" para "salvar", com este saber, os que habitam nesta.

Ao contrário, educar e educar-se, na prática da liberdade, é tarefa daqueles que sabem que pouco sabem — por isto sabem que sabem algo e podem assim chegar a saber mais — em diálogo com aqueles que, quase sempre, pensam que nada sabem, para que estes, transformando seu pensar que nada sabem em saber que pouco sabem, possam igualmente saber mais.

Paulo Freire

DALCHIAVON, F.C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto**. Ilha Solteira, 2010. 113f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

RESUMO

O arroz é uma das fontes básicas de alimentação da humanidade. No processo de modernização e racionalização da agricultura brasileira, o uso de adubação adequada constitui um fator importante para o aumento da produtividade das culturas, redução dos custos de produção, maior retorno econômico para os produtores e redução do risco de degradação do meio ambiente. Assim, durante o ano agrícola 2009/2010, no município de Selvíria (MS), no Cerrado Brasileiro, foram estudados os atributos do arroz de terras e os atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob sistema plantio direto, irrigado por pivô central. O objetivo foi selecionar entre os atributos pesquisados, aquele com a melhor correlação, linear e espacial, para explicar a variabilidade da produtividade do arroz de terras altas. Foi instalada a malha geostatística, para a coleta de dados do solo e da planta, com 120 pontos amostrais, numa área de 3,0 ha e declive homogêneo de 0,055 m m⁻¹. Do ponto de vista linear, o número de espiguetas viáveis por panícula apresentou correlação potencial direta com a produtividade de grãos de arroz. Entretanto, do ponto de vista espacial, o teor da matéria orgânica do solo, quando avaliada na camada 0,10 - 0,20 m, apresentou-se como indicador da produtividade de grãos de arroz. Dessa forma, visando-se auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais venham a utilizar os mesmos atributos que os do presente, os valores dos alcances da dependência espacial a serem empregados deverão estar compreendidos entre 40,2 e 181,2 metros.

Termos de indexação: Agricultura de precisão. Componentes de produção do arroz. Fertilidade do solo. Manejo do solo. *Oryza sativa* L. Sistema plantio direto.

DALCHIAVON, F.C. **Aspects of the rice crop productivity of uplands irrigated with chemical attributes to soil under no-tillage.** Ilha Solteira, 2010. 113p. Dissertation. (Master Degree of Systems of Production) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

ABSTRACT

The rice is one of the basic sources of the humanity's feeding. In the modernization process and rationalization of the Brazilian agriculture, the use of appropriate fertilization constitutes an important factor for the increase of the yield crop, reduction of the production costs, larger economical return for the producers and reduction of the risk of degradation of the environment. Like this, during the agricultural year 2009/2010, in Selvíria County, Mato Grosso do Sul State, in the Brazilian Savannah, they were studied the attributes of the rice uplands and the chemical attributes in a Dystropherric Red Latosol (Typic Acrustox) under no-tillage, irrigated by central pivot. The objective was to select among the researched attributes, that with the best correlation, spatial and linear, to explain upland rice yield variability. The geostatistical grid was installed, to collect the soil and plant data, with 120 sampling points, in an area of 3.0 ha and homogeneous slope of 0.055 m m^{-1} . Of the linear point of view, the number of viable spikelets per panicle showed direct potential correlation with the yield of grains of rice. However, of the spatial point of view, the organic matter soil, when appraised in the layer 0.10-0.20 m, showed up came as indicator of the yield of grains of rice. Thus, in order to support future researches concern precision agriculture, which uses the same attributes of this research, the values of the range of the spatial dependence to be utilized should be among 40.2 and 181.2 meters.

Index terms: Precision agriculture. Rice production components. Soil fertility. Soil management. *Oryza sativa* L. No-tillage.

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
Figura 1: Exemplo de semivariograma experimental.....	29
Figura 2: Precipitação pluvial e médias térmicas, obtidas na área experimental, durante o período de novembro de 2009 a março de 2010.	36
Figura 3: Aspecto da área experimental onde foi implantada a cultura do arroz sob pivô central.....	36
Figura 4: Curva da resistência mecânica à penetração e valores da umidade gravimétrica das três camadas estudadas do solo.	39
Figura 5: Imagem da área antes da dessecação (a), realizando a dessecação (b), tratamento de sementes com inseticida (c) e semeadura do arroz (d).....	40
Figura 6: Imagens da lavoura do arroz sob o sistema plantio direto no estágio vegetativo aos 11 DAS (a), aos 29 DAS (b) e aos 66 DAS (c), no início da emissão das panículas aos 78 DAS (d), no enchimento das espiguetas aos 92 DAS (e) e no ponto de maturação fisiológica/colheita aos 108 DAS (f).....	42
Figura 7: Esquema da malha experimental de campo com os 120 pontos amostrais.	43
Figura 8. Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.....	48
Figura 9: Equação de regressão da produtividade de grãos de arroz de terras altas em função do número de espiguetas viáveis por panícula em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob sistema plantio direto	68
Figura 10: Semivariograma simples, validação cruzada e mapa de krigagem da produtividade do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob sistema plantio direto	74

Figura 11: Semivariogramas simples dos componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	75
Figura 12: Semivariogramas simples dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, #K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto.....	76
Figura 13: Semivariogramas simples dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, #T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto.....	77
Figura 14: Semivariogramas simples dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, #K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto.....	78
Figura 15: Semivariogramas simples dos atributos químicos (H+Al2, Al2, S2, #T2, V%2 e m%2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto.....	79
Figura 16: Validação cruzada dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, #K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto.....	82
Figura 17: Validação cruzada dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, #T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto	83
Figura 18: Validação cruzada dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, #K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto.....	84
Figura 19: Validação cruzada dos atributos químicos (H+Al2, Al2, S2, #T2, V%2 e m%2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto	85

Figura 20: Mapas de krigagem dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, £K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto	87
Figura 21: Mapas de krigagem dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, £T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto.....	88
Figura 22: Mapas de krigagem dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, £K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto	89
Figura 23: Mapas de krigagem dos atributos químicos (H+Al2, Al2, S2, £T2, V%2 e m%2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto.....	90
Figura 24: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do MO2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	94
Figura 25: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do H+Al2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	95
Figura 26: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do m%2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	96

LISTA DE QUADROS

Quadros

Página

Quadro 1: Limites de interpretação de teores de potássio e de fósforo em solos.....	26
Quadro 2: Limites de interpretação de teores de cálcio e magnésio em solos	26
Quadro 3: Limites de interpretação das determinações relacionadas com a acidez da camada arável do solo	26
Quadro 4: Análise inicial de alguns atributos químicos (MO, pH, P e K ⁺) para fins de fertilidade do solo estudado.....	38
Quadro 5: Análise inicial de alguns atributos químicos (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , H ⁺ +Al ³⁺ , Al ³⁺ , SB, CTC, V% e m%) para fins de fertilidade do solo estudado	38
Quadro 6: Análise inicial de alguns atributos físicos do solo estudado	38
Quadro 7: Análise descritiva de alguns componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	51
Quadro 8: Análise descritiva de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto	53
Quadro 9: Análise descritiva de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto	54
Quadro 10: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	61

Quadro 11: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto	63
Quadro 12: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto	64
Quadro 13. Equações de regressão linear múltipla obtidas pelo método <i>Stepwise</i> , número de observações (N) e coeficiente de determinação (R^2) para as variáveis independentes (planta e solo).....	68
Quadro 14. Peso na soma de quadrados e peso em porcentagem dos atributos em cada modelo ajustado pela regressão linear múltipla obtida pelo método <i>Stepwise</i>	69
Quadro 15: Parâmetros dos semivariogramas simples para alguns componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto	71
Quadro 16: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade do arroz de terras altas com atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto	72
Quadro 17: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade do arroz de terras altas com atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto	73

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Aspectos gerais da cultura do arroz.....	17
2.2. Necessidade hídrica	17
2.3. Características do arroz de terras altas e a cultivar IAC 202.....	18
2.4. Época de semeadura	19
2.5. População e arranjo espacial de plantas	19
2.6. Componentes da produção da cultura do arroz	19
2.7. Solo agrícola ideal	20
2.7.1. Nitrogênio (N) e Matéria Orgânica (MO)	21
2.7.2. Fósforo (P).....	21
2.7.3. Bases trocáveis: Potássio (K^+), Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}).....	22
2.7.4. Acidez do solo	23
2.8. Limites de interpretação dos atributos da fertilidade do solo.....	25
2.9. Sistema plantio direto para a cultura do arroz	25
2.10. A geoestatística na pesquisa agronômica	28
2.10.1. Semivariograma.....	29
2.10.2. Interpolação dos dados por krigagem ordinária	31
2.10.3. Semivariograma cruzado	32
2.10.4. Cokrigagem	32
2.10.5. A agricultura de precisão.....	32
2.10.6. Variabilidade espacial aplicada às culturas agrícolas e ao solo.....	33
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1. Caracterização do local de origem dos dados.....	35
3.2. Caracterização inicial do solo estudado.....	35
3.3. Implantação, condução e colheita da cultura do arroz.....	37
3.5. Implantação e caracterização da malha experimental de campo.....	41
3.6. Coleta dos dados e metodologia de determinação dos atributos pesquisados.....	41
3.7. Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados.....	46
3.7.1. Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade	47

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Análise descritiva dos dados.....	50
4.1.1. Variabilidade dos atributos.....	50
4.1.1.1. Atributos da planta.....	50
4.1.1.2. Atributos do solo	52
4.1.2. Distribuição de frequência dos atributos	55
4.1.2.1. Atributos da planta.....	55
4.1.2.2. Atributos do solo	55
4.1.3. Valores médios dos atributos.....	56
4.1.3.1. Atributos da planta.....	56
4.1.3.2. Atributos do solo	58
4.2. Análise de regressão entre os atributos	60
4.2.1. Regressão linear simples	60
4.2.1.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos.....	60
4.2.1.1.1. Atributos da planta <i>versus</i> atributos da planta.....	60
4.2.1.1.2. Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	62
4.2.1.1.3. Atributos do solo <i>versus</i> atributos do solo	65
4.2.1.2. Regressão linear simples entre os atributos.....	67
4.2.1.3. Regressão linear múltipla entre os atributos (<i>stepwise</i>).....	67
4.3. Análise geoestatística dos atributos.....	70
4.3.1. Análise semivariográfica simples.....	70
4.3.1.1. Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos	70
4.3.1.2. Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados para os atributos ...	81
4.3.1.3. Mapas de krigagem dos atributos	86
4.3.2. Análise semivariográfica cruzada.....	92
4.3.2.1. Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem dos atributos ...	92
5. CONCLUSÕES	98
6. REFERÊNCIAS	99

1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das fontes básicas de alimentação da humanidade, presente no dia a dia de mais da metade da população mundial. Este cereal é considerado uma espécie adaptada às condições adversas de solo, entretanto, é responsiva a adubação. Sua exigência nutricional é determinada por vários fatores, tais como condições climáticas, tipo de solo, cultivar, produtividade esperada e das práticas culturais adotadas. Portanto, os nutrientes devem estar presentes no solo em quantidade e na forma disponível, de maneira que a planta de arroz possa completar normalmente o seu ciclo e desempenhar o seu potencial produtivo.

No processo de modernização e racionalização da agricultura brasileira, o uso de adubação adequada constitui um fator importante para o aumento da produtividade das culturas. O custo crescente dos insumos agrícolas exige, cada vez mais, a adoção de adequadas técnicas de cultivos para a produção das culturas anuais, como o arroz. A elevação dos custos dos fertilizantes nos últimos anos é provavelmente irreversível, já que é reflexo de preços mais elevados de energia, matéria-prima e transporte (FAGERIA; SANTOS, 2007), exigindo maior dispêndio nos investimentos agrícolas, merecendo atenção especial no seu uso, com vistas a um melhor aproveitamento pelas culturas. O uso adequado de adubação aumenta a produtividade e reduz o custo da produção, propiciando maior retorno econômico para os produtores e reduzindo o risco de degradação do meio ambiente (DURIGON, 2007).

Paralelamente a esses fatores, há uma tendência de integração de diversas fontes de dados com a finalidade de melhor gerenciar a produção agrícola, ocorrida em virtude do reconhecimento cada vez maior de que as culturas e os solos não devem ser manejados individualmente e de forma espacialmente homogênea, reforçando a afirmação de Grego e Vieira (2005), onde a aplicação de tecnologia associada à

variabilidade espacial se faz necessária, sobretudo na pesquisa agrícola, que estuda o solo e a sua capacidade produtiva.

Neste sentido, a agricultura de precisão surge como um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que os sistemas de produção agrícolas sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e os fatores a ela relacionados (MOLIN, 2000). Os dados de variabilidade espacial e temporal são georreferenciados e organizados em múltiplas camadas de informações que freqüentemente são processadas em mapas, por meio de uma variedade de técnicas geoestatísticas. Segundo Lamparelli et al. (2001), a geoestatística representa um conjunto de técnicas que estimam valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área. A ferramenta básica da geoestatística é o método de interpolação denominado krigagem, cujo produto é um mapa da área segundo um atributo, com estimativas não viciadas e de mínima variância.

Existe uma demanda de pesquisa com esse enfoque no âmbito de auxiliar os produtores a minimizar os custos de produção. Considerando o exposto, uma pesquisa relacionando a variabilidade espacial da produtividade da cultura do arroz com os atributos do solo se faz necessária, aliando produtividade às práticas de fertilização. Desta forma, sabendo que a incorporação de novas áreas ao sistema produtivo exige conhecimento prévio das características químicas dos solos que serão trabalhados, o estudo dos aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto teve como objetivo analisar as correlações, lineares e espaciais, entre a produtividade do arroz de terras altas com os demais atributos pesquisados, visando determinar aquele(s) que melhor se relaciona(m) com o aumento da produtividade agrícola em questão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais da cultura do arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados no mundo, constituindo a base da alimentação de mais da metade da população. No Brasil, é o cereal mais consumido e apreciado por pessoas de todas as camadas sociais, sendo importante fonte de calorias e de aminoácidos na dieta alimentar (ARF et al., 2001), além de carboidratos, lipídios, minerais, vitaminas, compostos fenólicos e ácido fítico, sendo o teor do composto influenciado pela forma de consumo do grão, se arroz na forma integral ou branco polido (WALTER et al., 2008).

A atual denominação “arroz de terras altas” pretende resgatar a credibilidade do arroz de sequeiro, utilizando-se de cultivares melhoradas e altamente produtivas, onde a inserção da cultura em sistemas agrícolas sustentáveis possibilita a exploração de todas as suas aptidões. Este sistema de cultivo de arroz é o que predomina no Brasil, cujo fornecimento hídrico fica na dependência da precipitação pluvial e de sua distribuição (SANTOS et al., 2008). Contudo, uma importância deve ser dada às áreas de produção com sistema de irrigação, sobretudo em terras altas sob pivô central, que vêm aumentando ano após ano. Esta é uma estratégia para o agricultor fugir dos veranicos, evento este que diminuiu a absorção de nutrientes pela cultura e que, dependendo da fase em que a cultura encontra-se, pode acarretar queda de produtividade, depreciação qualitativa dos grãos e, conseqüentemente, prejuízos ao rizicultor.

2.2. Necessidade hídrica

As características do regime pluvial, expressas pela quantidade e a distribuição das chuvas durante o ciclo da planta de arroz de sequeiro, são os fatores mais limitantes para produção de grãos. Se ocorrer estresse hídrico durante o período reprodutivo, de nada adiantará supri-la de água nas fases seguintes, pois o processo é irreversível. Para diminuir os efeitos negativos decorrentes da deficiência hídrica torna-se necessário

semear em períodos nos quais a fase de florescimento-enchimento de grãos tenha alta probabilidade de coincidir com a época com maior precipitação pluvial (BRESEGHELLO, 1998; PINHEIRO, 1999).

Quanto à necessidade de água, a demanda hídrica total da cultura do arroz de terras altas é 600 mm, conforme preconizado pela Embrapa (2003). Considera-se que o arroz consome 30% de suas exigências na fase vegetativa, 55% na reprodutiva e 15% durante a maturação. Em média, cerca de 180 a 300 mm de água/mês são necessários para produzir satisfatoriamente (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006).

2.3. Características do arroz de terras altas e a cultivar IAC 202

A produção de arroz está condicionada em arroz de terras altas (sequeiro e irrigado por aspersão) e arroz irrigado por inundação (várzeas). Para ambientes de terras altas, com o cultivo em regiões sob irrigação suplementar, buscou-se, a partir do ano de 1980, alterar o tipo de planta tradicional. Tais alterações implicavam na redução do porte da planta, aumento do perfilhamento e a redução do comprimento das folhas superiores, visando evitar o acamamento, aumentar a eficiência da absorção de luz, perfilhamento de médio a alto, panículas com 150 a 180 espiguetas, ciclo precoce a médio, resistência ao brusone e à mancha parda, certo grau de tolerância à seca, grãos longos e finos e aumento de rendimento no benefício (PINHEIRO, 1999).

Como exemplo destas alterações de características cita-se a cultivar IAC 202, lançada comercialmente em 1998. Esta é a denominação comercial da linhagem IAC 1205, obtida do cruzamento entre as cultivares Lemont e IAC 25, realizado no Centro Experimental de Campinas. A Lemont é uma cultivar americana, de porte baixo e excelente qualidade de grãos. A IAC 25 é uma tradicional cultivar de arroz de terras altas. A cultivar IAC 202 apresenta altura média de 87 cm, com ótima resistência ao acamamento em condições normais de desenvolvimento vegetativo, floração em torno de 90 dias e ciclo médio de 125 dias. As panículas, do tipo intermediário, possuem em média 169 grãos, com massa de 100 sementes em torno de 2,2 g. Os grãos são longos e finos, com ótimo rendimento de grãos inteiros (82%) no beneficiamento e produtividade média entre 4000 e 6000 kg ha⁻¹. Seu cultivo é recomendado para o estado de São Paulo, em regiões com solos de média a alta fertilidade, com semeadura nos meses de outubro e novembro. Devido ao porte relativamente baixo, recomenda-se a semeadura em espaçamentos menores que aqueles utilizados para cultivares tradicionais e densidade em torno de 200 sementes m⁻², estande de 40 a 60 plantas por metro no

sentido da linha de semeadura, representando um gasto de sementes em torno de 40 a 50 kg ha⁻¹ (BASTOS, 2000).

2.4. Época de semeadura

A época de semeadura é de extrema importância pois influencia o desenvolvimento das plantas e reflete no processo de colheita, que pode ser prejudicado se coincidir com períodos chuvosos, acarretando perdas por acamamento, debulha e depreciação do produto. A semeadura feita em época adequada, conforme recomendação da pesquisa para a cultivar e região, propicia boa produtividade e colheita eficiente (VIEIRA; CARVALHO, 1999).

Fornasieri Filho e Fornasieri (2006) salientaram que, em função do efeito da soma térmica (graus dia), variações na época de semeadura resultam em alterações no ciclo, na estatura das plantas, no tamanho da panícula, na incidência de doenças, nos componentes da produção, na produtividade e na qualidade de grãos. Nas semeaduras realizadas em setembro/outubro, as baixas temperaturas que ocorrem no início do ciclo limitam o desenvolvimento das plantas de arroz, causando aumento da duração da fase vegetativa, o que pode resultar em maior perfilhamento e maior número de panículas por área. Para Arf et al. (2000), semeaduras antecipadas (setembro-outubro) causam menores índices de acamamento. Já, nas semeaduras tardias (novembro-dezembro), o estágio de *emborrachamento* (período de 14 a 7 dias antes da emissão das panículas) e de florescimento podendo ocorrer em temperaturas mais altas, a esterilidade de grãos e, conseqüentemente, diminuindo o número de espiguetas granadas por área, com danos à produtividade, além do aumento da incidência de brusone (*Pyricularia grisea*).

2.5. População e arranjo espacial de plantas

A população e o arranjo espacial adequados irão proporcionar um aproveitamento eficiente de água, luz e nutrientes e melhor controle de plantas daninhas, insetos-pragas e doenças. No estado de São Paulo, de modo geral, tem-se recomendado no sistema de terras altas irrigado por aspersão, espaçamento de 0,30 - 0,40 m entre linhas com 60 a 90 sementes por metro, variando em função das condições de solo, para obter em torno de 200 plantas m⁻² (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006).

2.6. Componentes da produção da cultura do arroz

Segundo Fornasieri Filho e Fornasieri (2006), a produção de sementes de arroz é o resultado do produto de três componentes principais: número de perfilhos férteis

(panículas) por unidade de área, número de espiguetas férteis (sementes) por panícula e massa unitária da semente. O número de panículas por área (perfilhos férteis) é função da capacidade de perfilhamento da cultivar e do sistema de cultivo. O número de espiguetas por panícula é influenciado por condições externas no período a partir da diferenciação do primórdio da panícula e pela quantidade de, principalmente, nitrogênio acumulado nas folhas, até o momento da diferenciação. A porcentagem de espiguetas férteis é a relação entre o número de espiguetas adequadamente granadas e o total de espiguetas por panícula. A massa unitária da semente é determinada durante o período compreendido entre as etapas de diferenciação das ramificações secundárias da raque e da maturidade fisiológica.

Assim, a qualidade das sementes e a produtividade da cultura são satisfatórios em condições de boa disponibilidade hídrica (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). Em casos de deficiência hídrica, pelos efeitos causados aos componentes de produção, ocorrerão conseqüências negativas na produtividade e no rendimento de benefício da cultura do arroz (CRUSCIOL et al., 2001). Segundo Crusciol et al. (2002), isso ocorre quando a porcentagem de espiguetas vazias e sementes mal formadas aumenta, ocasionada pela ocorrência de deficiência hídrica durante as fases de emissão das panículas e do enchimento das sementes. Com o uso da irrigação por aspersão, as plantas não ficam sujeitas à ocorrência de deficiência hídrica, e o processo de enchimento das sementes é contínuo, com isso, aumenta o número de espiguetas granadas por panícula e a massa das sementes.

2.7. Solo agrícola ideal

O arroz é considerado uma espécie adaptada às condições de acidez do solo, porém, responsivo à calagem. Considerando que a calagem corrige a acidez e propicia melhores condições para o desenvolvimento da planta desde o início do ciclo, recomenda-se que a correção da acidez do solo seja realizada sempre que o pH em água for menor que 5,5, possibilitando que a cultura expresse o seu potencial produtivo (DUARTE et al., 1999).

Para manter a fertilidade de um determinado solo em níveis adequados é necessário conhecer a exigência nutricional da cultura. A exigência nutricional do arroz é determinada por vários fatores, tais como condições climáticas, tipo de solo, cultivar, produtividade esperada e das práticas culturais adotadas. Portanto, para produzir uma tonelada de grãos, é necessário que tenham sido acumulados na parte aérea da planta as

seguintes quantidades de nutrientes: 47 kg de N; 34 kg de K; 7,5 kg de P; 5,5 kg de Ca; 4,5 kg de Mg; 1043 g de Fe; 377 g de Mn; 96 g de Zn e 23 g de Cu (FAGERIA, 1999a).

2.7.1. Nitrogênio (N) e Matéria Orgânica (MO)

O nitrogênio é o nutriente que proporciona as melhores respostas sobre a produtividade do arroz, sendo considerado como fator determinante para o aumento da produtividade grãos. Na atualidade, não existe um método capaz de avaliar satisfatoriamente a disponibilidade de nitrogênio no solo às plantas, devido a maior parte desse elemento encontrar-se sob a forma orgânica. Assim, como a forma nítrica está sujeita à lixiviação, imobilização e à denitrificação, não é possível traçar a curva de calibração. Contudo, em alguns estados brasileiros, o teor de N disponível é estimado em função do teor de matéria orgânica contida na camada arável do solo, considerando como N disponível valores entre 1 e 5% da MO do solo, variando em função da sua taxa de mineralização, portanto não é plenamente confiável (SOUZA; MELO, 2000).

O arroz necessita de N durante a fase vegetativa para aumentar o número de perfilhos e, conseqüentemente, o número de panículas; durante a fase reprodutiva, para aumentar o número de espiguetas panícula⁻¹; na maturação é importante para o processo de fotossíntese, mantendo as folhas verdes e, conseqüentemente, aumentando a porcentagem de espiguetas granadas (FAGERIA, 1998). De acordo com Crusciol et al. (2007), cerca de 50% do N absorvido pela cultura do arroz é exportado pelos grãos.

Villela (2000), ao estudar os efeitos de 4 níveis de N (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia) aplicados ao solo em 3 épocas, sobre os componentes de produção, produtividade e qualidade de grãos e qualidade de sementes das cultivares de arroz irrigado: IAC 101, IAC 102 e IAC 242, verificou influência positiva da fertilização nitrogenada na estatura das plantas, número e massa de grãos panícula⁻¹, massa de 1000 grãos, dimensões e produção de grãos e rendimento de grãos no beneficiamento.

2.7.2. Fósforo (P)

Os solos do cerrado brasileiro, em sua maioria, têm baixos teores de fósforo. Dentre os macronutrientes primários, o P é o de menor exigência para a cultura do arroz, porém é o de maior exportação percentual no produto colhido (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006) e o mais deficiente na maioria dos solos brasileiros, devido ao baixo teor natural e a alta capacidade de fixação (FAGERIA, 1999a). Aproximadamente 65% do nutriente absorvido é exportado pelos grãos (CRUSCIOL et al., 2007). Além desses fatores, a difusão de P no solo é mais limitante para a absorção

de P do que a própria velocidade de absorção radicular, daí a importância da irrigação do arroz de terras altas (ARAÚJO, 2000).

Em diversas culturas tem sido demonstrado que o P exerce grande influência sob o crescimento radicular, no entanto, na cultura do arroz de terras altas os estudos são, praticamente, inexistentes. Entretanto, Fageria (1999b) relatou que o P aumenta o número de perfilhos dos cereais em geral e, com isso, o número de panículas e, conseqüentemente, desempenha um importante papel na produção de grãos. Já Sant'Ana (2000) obteve diferenças significativas para o perfilhamento de plantas de arroz de sequeiro em função de doses de P, o que mostra a capacidade de resposta ao nutriente; Crusciol et al. (2005) observaram que o diâmetro radicular da cultura do arroz foi influenciado apenas pelas doses de P (0, 50, 100 e 200 mg dm⁻³), utilizando-se como fonte superfosfato simples, enquanto o comprimento, superfície e volume radicular foram influenciados pelos fatores doses de P e cultivares, e pela interação desses fatores, apresentando incremento com comportamento quadrático até a dose de 100 mg dm⁻³. Estes mesmos autores ainda relataram que o desenvolvimento das cultivares Carajás e IAC 202, em relação às demais, é mais intenso com a aplicação das menores doses de P (0, 50 e 100 mg dm⁻³) e, também, atingiram o máximo crescimento radicular e acúmulo de matéria seca com doses menores. Tokura et al. (2007) observaram que a aplicação de P incrementa a produção de matéria seca da parte aérea (até a dose de 400 mg dm⁻³) e de grãos das plantas de arroz (até a dose de 350 mg dm⁻³).

2.7.3. Bases trocáveis: Potássio (K⁺), Cálcio (Ca²⁺) e Magnésio (Mg²⁺)

A resposta da cultura do arroz à aplicação de potássio não é tão marcante quanto à obtida com aplicação de nitrogênio e fósforo (FAGERIA, 2000). Entretanto, Crusciol et al. (1999) ressaltaram que o K é um dos elementos mais exigidos pela cultura do arroz de sequeiro, sendo superado apenas pelo N. Contudo, apenas 16% do total absorvido é exportado pelos grãos (CRUSCIOL et al., 2007). Farinelli et al. (2004) salientaram que, comparado a outros nutrientes, o potássio é extraído em maior quantidade pelas cultivares modernas de arroz irrigado.

O potássio tem pouco efeito no perfilhamento, a não ser em condições de extrema carência desse nutriente. Porém, o elemento é muito importante para a massa de grãos, número de espiguetas granadas panícula⁻¹, número de panículas m⁻² e produtividade de grãos (ZARATIN et al., 1999), talvez por facilitar o transporte de carboidratos, sendo necessário seu suprimento contínuo até o crescimento da panícula,

quando se finaliza a fase reprodutiva da cultura. Além disso, o K aumenta a resistência das plantas às doenças, favorecendo a formação dos grãos, tornando-os mais pesados, com panículas mais cheias e perfeitas (MALAVOLTA et al., 1997), podendo até minimizar o efeito negativo de uma deficiência hídrica através do papel que exerce sobre a abertura e fechamento dos estômatos das folhas, reduzindo, assim a perda de água (CRUSCIOL et al., 1999).

Segundo Crusciol et al. (2007), da mesma forma que o relatado para o K, somente uma pequena parte do cálcio e magnésio absorvido é exportado da área pelos grãos de arroz. Entretanto, em sistemas que resultam elevada produtividade, como o irrigado, a exigência da cultura do arroz pelos nutrientes é alta. Assim, observa-se que a maior disponibilidade hídrica no sistema irrigado, além de promover maior produtividade, pode proporcionar maiores teores de nutrientes nos grãos. Dessa forma, é importante ressaltar que a não reposição ou quantitativamente inadequada desses nutrientes, pode levar ao rápido esgotamento do solo e à redução da produtividade, sendo a prática da calagem a maneira mais utilizada e mais em conta de repô-los ao solo.

2.7.4. Acidez do solo

A toxidez por alumínio é um dos principais limitantes da expansão da produtividade em solos ácidos, os quais representam uma grande área com capacidade produtiva de regiões tropicais e subtropicais (UEXKULL; MUTER, 1995). A ocorrência de toxidez por alumínio é de grande importância nos solos brasileiros, uma vez que, além de altos índices de acidez, apresentam naturalmente baixos teores de P, Ca e Mg. Por outro lado, o arroz é uma cultura capaz de se adaptar a diferentes tipos de ambientes, incluindo solos de baixa fertilidade ou com problema de toxidez por alumínio (MENDONÇA et al., 2003).

De acordo com Freitas et al. (2006), a obtenção de cultivares tolerantes à toxidez por alumínio tem despertado o interesse de muitas áreas da pesquisa agrícola, particularmente quando se pretende explorar eficientemente solos com acidez subsuperficial e elevado nível de alumínio. A calagem corrige apenas as camadas superficiais do solo e o subsolo permanece ainda ácido, podendo restringir o crescimento das raízes das cultivares sensíveis ao alumínio. Especificamente para a cultura do arroz, esta questão é menos evidente, pois as cultivares disponíveis no mercado apresentam certa tolerância a ambientes com elevados teores de alumínio

trocável, possibilitando produtividades satisfatórias mesmo sob condições adversas de acidez trocável e/ou valores inferiores de pH.

Contudo, o alumínio interfere na absorção e movimentação do fósforo, cálcio, magnésio e potássio. Em condições de estresse desses elementos, as plantas paralisam seu crescimento radicular e reduzem a absorção dos nutrientes essenciais, influenciando a produtividade. Neste sentido, Sivaguru e Paliwal (1993) constataram que as cultivares de arroz que são tolerantes ao alumínio apresentaram teores de fósforo e cálcio mais elevados que as plantas sensíveis, entretanto, podendo ser apenas a resultante de maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular da cultivar tolerante, que exploraria maior volume de solo, enfatizaram Mendonça et al. (2003). Os autores desenvolveram um trabalho cujo propósito foi avaliar o efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz, sendo uma resistente e outra sensível, e concluíram que na presença de Al^{+3} , a cultivar tolerante é mais eficiente na utilização dos macronutrientes estudados do que a sensível, e que os macronutrientes cujos teores foram mais reduzidos nas raízes da planta seguiram a seguinte ordem: $K > Mg > P$ e $Ca > Mg = K > P$ e na parte aérea, $Mg > Ca > P$ e $Mg > Ca > P > K$ nas cultivares tolerante e sensível, respectivamente.

Vários mecanismos de tolerância ao alumínio pelas plantas estão sendo pesquisados e podem ser classificados em dois grupos: i) *mecanismos externos*, em que as plantas tolerantes liberam ácidos orgânicos pelas raízes, geralmente citrato e malato, que se ligam ao alumínio formando complexos estáveis, impedindo a absorção pela planta e ii) *mecanismos internos*, em que o alumínio é absorvido para o interior celular, onde é inativado por alguma enzima ou isolado no interior do vacúolo (JO et al., 1997). No entanto, Mendonça et al. (2003) afirmaram que tais mecanismos, bem como os principais fatores que afetam essa tolerância, ainda não foram esclarecidos.

Outra hipótese é que a tolerância de algumas plantas ao alumínio pode estar associada com a capacidade que elas têm de elevar o pH na rizosfera. Assim, reduz-se a solubilidade e a conseqüente absorção do Al^{+3} , amenizando os efeitos fitotóxicos desse íon (SILVA et al., 2002a). Essa capacidade tem sido encontrada em várias espécies de importância econômica, inclusive em algumas cultivares de arroz, justificando a sua utilização em terras recém desbravadas. A capacidade das plantas de modificar o pH da rizosfera esta relacionada tanto com a espécie/cultivar quanto à fatores do ambiente, entre os quais a nutrição nitrogenada. Quando o nitrogênio é suprido exclusivamente na

forma nítrica, as plantas tendem a elevar o pH do meio utilizado em razão desse ânion ser absorvido predominantemente por um simporte tipo $\text{OH}^-/\text{NO}_3^-$, que retira prótons do meio externo (TISCHNER, 2000). Em contrapartida, quando o N é suprido exclusivamente na forma amoniacal, o íon NH_4^+ é absorvido por um canal de cátions sem a absorção concomitante de prótons e, portanto, resulta no abaixamento do pH no meio externo (ANTUNES; NUNES, 1997).

Reforçando esta idéia, Mendonça et al. (2005) observaram que cultivares de arroz tolerantes ao Al^{+3} produzem raízes mais compridas e numerosas do que cultivares sensíveis, na presença ou na ausência de Al e, por esse motivo, consomem sempre mais H^+ das soluções nutritivas, com N exclusivamente na forma de NO_3^- , e menos H^+ nas soluções com o N exclusivamente na forma de NH_4^+ . Desta forma, acredita-se que cultivar tolerante, além de elevar o pH da solução nutritiva mais do que a sensível, é capaz de metabolizar o nitrato com maior eficiência em presença de Al. Contudo, de uma maneira geral, para valores de pH acima de 5,5 a cultura do arroz já se desenvolve satisfatoriamente.

2.8. Limites de interpretação dos atributos da fertilidade do solo

Diversos elementos químicos são indispensáveis à vida vegetal já que, sem ele, as plantas não conseguem completar o seu ciclo de vida. Esse é um dos critérios para caracterizar se um elemento é essencial ou não. Outro critério baseia-se no fato do elemento fazer parte de um componente ou metabólico essencial ou ativar processos metabólicos na planta (RAIJ, 1991).

Os limites de classes desses nutrientes de plantas foram estabelecidos com ensaios de calibração, principalmente para culturas anuais, em condições de campo e levando em conta as respostas aos elementos aplicados na adubação, expressos em termos de produtividade relativa. Desta forma, estão apresentados nos Quadros 1, 2 e 3, os limites de interpretação para os atributos da fertilidade do solo potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), pH em cloreto de cálcio (pH em CaCl_2) e saturação por bases (V%), conforme classificação proposta por Raij et al. (1997).

2.9. Sistema plantio direto para a cultura do arroz

O Sistema Plantio Direto (SPD), que ocupa aproximadamente 26 milhões de hectares no Brasil, tem-se destacado como uma alternativa muito importante na produção de grãos, permitindo o cultivo com menores impactos ao meio ambiente e concorrendo para maior preservação dos recursos solo e água. As novas cultivares de

Quadro 1: Limites de interpretação de teores de potássio e de fósforo em solos

Teor	Produção relativa	K ⁺ trocável	P resina
			Anuais
	%	mmol _c dm ⁻³	-----mg dm ⁻³ -----
Muito baixo	0 - 70	0,0 – 0,7	0 – 6
Baixo	71 - 90	0,8 – 1,5	7 – 15
Médio	91 - 100	1,6 – 3,0	16 – 40
Alto	> 100	3,1 – 6,0	41 – 80
Muito alto	> 100	> 6,0	> 80

Adaptado Raij et al. (1997)

Quadro 2: Limites de interpretação de teores de cálcio e magnésio em solos

Teor	Ca ⁺ trocável	Mg ⁺ trocável
	-----mmol _c dm ⁻³ -----	
Baixo	0 - 3	0 – 4
Médio	4 - 7	5 – 8
Alto	> 7	> 8

Adaptado Raij et al. (1997)

Quadro 3: Limites de interpretação das determinações relacionadas com a acidez da camada arável do solo

Acidez	pH em CaCl ₂	Saturação por bases	V
			%
Muito alta	Até 4,3	Muito baixa	0 – 25
Alta	4,4 – 5,0	Baixa	26 – 50
Média	5,1 – 5,5	Média	51 – 70
Baixa	5,6 – 6,0	Alta	71 - 90
Muito baixa	> 6,0	Muito alta	> 90

Adaptado Raij et al. (1997)

arroz de terras altas têm influenciado à adoção do SPD por razões econômicas e/ou pela necessidade de rotação de culturas, que é importante para o sistema. Assim, o seu cultivo em SPD vem-se consolidando, sobretudo em regiões com boa distribuição da precipitação pluvial ou sob pivô central, com perspectivas de altas produtividades, haja vista a ampla utilização do SPD em áreas cultivadas com milho/soja, onde o arroz apresenta-se como uma alternativa para a rotação de culturas (REIS et al., 2008).

Para Guimarães e Stone (2003) e Cazetta et al. (2008), o SPD, que se caracteriza pela mobilização do solo apenas na linha de semeadura e na manutenção de palhada na superfície do solo, é uma opção viável para se alcançar a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas na região do Cerrado. A maior consequência da adoção desta prática é a alteração da dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica do solo, principalmente em decorrência da manutenção do solo coberto pela palhada, minimizando a taxa de decomposição dos resíduos em relação aos que são incorporados ao solo. Outras vantagens da cobertura permanente do solo pela palhada são a minimização da evaporação da água por diminuir a entrada de energia solar no solo, evitando perda desnecessária e armazenando-a em maior quantidade no solo, o que pode ser importante sobre tudo em períodos de estiagens prolongadas; controle e/ou redução da erosão; redução da infestação de plantas daninhas por supressão; menor oscilação térmica do solo; melhor estruturação física do solo e reciclagem de nutrientes.

Entretanto, as áreas em SPD geralmente apresentam solos com densidades mais elevadas em virtude do não revolvimento do solo e da movimentação das máquinas e implementos agrícolas utilizados no manejo do cultivo agrícola, podendo comprometer a produtividade do arroz. Por outro lado, as semeadoras para SPD, atualmente equipadas com dispositivos para romper mais eficientemente as camadas compactadas, têm apresentado resultados positivos na indução do aprofundamento do sistema radicular do arroz de terras altas (GUIMARÃES; MOREIRA, 2001), constituindo-se, ao lado da própria capacidade de adaptação das cultivares, numa ferramenta importante para o seu cultivo em SPD.

Nos últimos anos, inúmeros trabalhos visando comparar o desempenho do SPD em relação ao convencional de arroz têm sido desenvolvidos no Brasil. Assim, destacam-se os trabalhos de Moura Neto et al. (2002) e Reis et al. (2008), onde ambos observaram que as cultivares e linhagens avaliadas têm comportamento semelhante para produtividade de grãos nos dois sistemas de cultivo, sendo evidenciado ainda que o

SPD constitui alternativa viável para a cultura do arroz de terras altas. Contudo, Cornélio et al. (2007) salientaram que a recomendação do SPD para o arroz de terras altas encontra-se em fase de pesquisas e não se tem ainda resultados conclusivos acerca dos benefícios que o mesmo possa proporcionar. Em contrapartida, Reis et al. (2004) enfatizaram que a maior limitação para o cultivo do arroz em terras altas em SPD talvez esteja relacionada à redução na macroporosidade do solo que o sistema provoca, que aliado à concentração superficial dos nutrientes, impedem o desenvolvimento radicular em profundidade, limitando a produtividade do arroz, sobretudo em sistema e regiões dependentes de chuva.

2.10. A geoestatística na pesquisa agronômica

Entre os fatores de produção responsáveis pela variabilidade espacial da produtividade das culturas, os atributos químicos do solo assumem grande importância, pois, em muitos casos, não variam no espaço e no tempo ao acaso, mas de acordo com uma continuidade aparente ou dependência espacial (CORÁ, 1997; CORÁ; BERALDO, 2006). Assim, Salviano et al. (1998) demonstraram que a planta atua de forma a responder, sobretudo quando sua produtividade é analisada espacialmente, de forma positiva e/ou negativa conforme o comportamento da variabilidade dos atributos químicos do solo.

Por outro lado, as variações espaciais dos atributos químicos do solo podem ser avaliadas através de técnicas geoestatísticas, que verificam a relação entre as várias amostras de uma mesma área, usando-se o estudo de variáveis regionalizadas (SILVA; CHAVES, 2001). Paralelamente, a geoestatística também estuda a variabilidade espacial dos atributos da planta, auxiliando na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados. Seu uso requer a coleta de amostras previamente planejadas, com a localização espacial exata de cada ponto amostral (VIEIRA et al., 1991). As técnicas da geoestatística trabalham com problemas de espacialização de variáveis e representam uma promissora ferramenta para trabalhos em Sistema de Informação Geográfica em três aplicações básicas: (a) estimativas: para inferir atributos em pontos diferentes daqueles originais, isto é, onde estes não foram coletados; (b) previsões: para detectar tendências e locais de máximos e mínimos; (c) desenhos de experimentos: para otimizar a segmentação da área em unidades de espaço (VALERIANO; PRADO, 2001).

2.10.1. Semivariograma

Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo de amostras vizinhas é pelo uso da autocorrelação. Porém, quando as amostras são referenciadas espacialmente para a interpolação entre locais medidos será necessária para a construção de mapas de isolinhas, uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial. Essa ferramenta é o semivariograma (VIEIRA et al., 1983). O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA, 2004) ou no tempo, definido por três parâmetros: o efeito pepita (C_0), o patamar ($C_0 + C$) e o alcance (A_0). O semivariograma pode ser estimado por:

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

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pelo vetor h , e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , e, portanto depende de ambos, magnitude e direção de h . A Figura 1 apresenta o comportamento típico de um semivariograma que apresenta dependência espacial. Pontos próximos entre si são mais semelhantes do que pontos mais afastados.

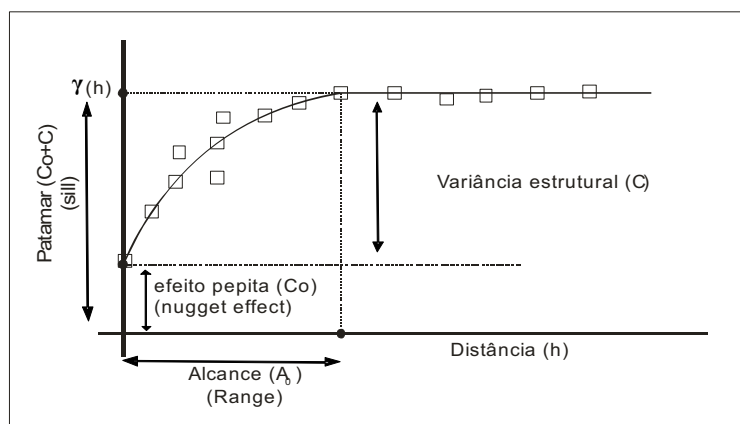


Figura 1: Exemplo de semivariograma experimental.

O efeito pepita (C_0) é representado por um valor da semivariância, diferente de zero, quando a distância entre pontos amostrais é nula. Assim, representa aquela variância que não pôde ser detectada pelo semivariograma, seja pela necessidade de coletas amostrais a distâncias menores, seja pela ocorrência de um erro qualquer em alguma etapa do trabalho. O patamar ($C_0 + C$) representa a distância na qual toda a semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985). O alcance (A_0) da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são altamente iguais entre si. Assim, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. Contudo, passam a assumir valores diferentes, maiores ou menores, somente para as distâncias estabelecidas a partir do seu valor. Seu conhecimento é de extrema importância à Agricultura de Precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora, e, assim, poder efetuar a distribuição de um determinado insumo com taxas variáveis no terreno (McBRATNEY; WEBSTER, 1986; VIEIRA et al., 1991).

No ajuste dos modelos experimentais (linear, esférico, exponencial e gaussiano), que depende do atributo e da camada de solo analisada (REICHERT et al., 2008), são considerados: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**); b) o maior coeficiente de determinação (r^2) e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (**ADE**). O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. Para cada atributo é estimado o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar (C_0+C). A classificação da dependência espacial (**ADE**) pode ser realizada mediante sugestões de Cambardella et al. (1994), modificadas pelo GS⁺ (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C/(C+C_0)].100.....(2)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; e $C+C_0$ é o patamar.

A interpretação para o **ADE** é a seguinte: a) **ADE** $\leq 25\%$ indica variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < \text{ADE} \leq 75\%$ indica variável espacial moderadamente dependente, e c) **ADE** $> 75\%$ indica variável espacial fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuam a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, são obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas de krigagem para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

2.10.2. Interpolação dos dados por krigagem ordinária

Existem diversos métodos de interpolação dos dados: método da triangulação, método dos polígonos, método do inverso da distância, método do vizinho mais próximo e método da krigagem ordinária. Entretanto, a maioria desses métodos não fornece o algoritmo dos erros associados aos resultados obtidos, diferentemente do método geostatístico da krigagem ordinária, segundo um modelo contínuo de variação espacial. Pelo método da krigagem ordinária, determinando-se o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar linearmente valores em qualquer posição na área de estudo, sem tendência e com variância mínima. Este é o método de interpolação dos dados mais utilizado no mapeamento dos atributos do solo (SCHLOEDER et al., 2001).

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

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \dots\dots\dots (3)$$

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

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

São definidos três tipos de mapas de isolinhas: mapas de condição, mapas de recomendação ou prescrição e mapas de desempenho. Os mapas de condição mostram a

distribuição espacial dos parâmetros avaliados em uma determinada área, antes de qualquer intervenção. Mapas de recomendação são derivados de um ou mais mapas de condição e contêm informações sobre as quantidades necessárias de insumos e/ou práticas agrícolas que cada local específico da área deverá receber (manejo específico), respeitando a variabilidade dos atributos avaliados (mapas de condição), sendo a base para a tecnologia da aplicação em doses variáveis. O mapa de desempenho permite avaliar como a área se apresenta após o manejo específico, caracterizando-se também como mapa de condição para um próximo ciclo no contexto da agricultura de precisão. A precisão dos mapas depende de fatores como a intensidade e esquema da amostragem e da escolha do método de interpolação dos dados, por influenciarem na estimativa dos valores dos atributos do solo em locais não amostrados.

2.10.3. Semivariograma cruzado

Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no semivariograma cruzado. Este método é chamado de cokrigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA, 2000).

2.10.4. Cokrigagem

A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para tanto, é necessário que exista a dependência espacial para cada uma e entre as variáveis Z_1 e Z_2 . Essa estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples (VAUCLIN et al., 1983), quando o semivariograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis. Conforme Montanari (2009), a principal vantagem da cokrigagem é a sua utilização para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração (a condutividade hidráulica), com base em outra de medição mais fácil (o teor de argila), desde que sejam correlacionadas espacialmente.

2.10.5. A agricultura de precisão

A uniformidade de manejo do solo ignora as variações naturais e induzidas em suas propriedades, e pode resultar em zonas com excesso e outras com falta de tratamentos, fazendo com que cresçam os problemas econômicos e ambientais associados a essa ineficaz aplicação de insumos no solo (OLIVEIRA, 2003). Sabe-se que os elevados níveis de produtividade agrícola estão associados ao uso intenso de insumos (PINCELLI, 2004). Face ao exposto, é eminente a necessidade de se encontrar

meios alternativos que possibilitem minimizar o uso de insumos e por extensão os custos de produção e o impacto ambiental, além de incrementar a produtividade das culturas. Assim, para Castro (2004) esta necessidade foi o que impulsionou a agricultura de precisão, do controle homogêneo ao controle espacialmente variável.

Segundo Johann (2004), a agricultura de precisão surgiu graças ao desenvolvimento e disponibilidade de algumas tecnologias, dentre as quais o sistema de informação geográfica (SIG) associado ao sistema de posicionamento global (GPS) para determinação exata da localização, sensores de produtividade, técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de aplicações de insumos à taxas variadas. Desta forma, em função da crescente demanda mundial por alimentos, Salvador (2002) relatou que está ocorrendo uma evolução natural no meio rural, que passa agora a ser mais empresarial do que de subsistência, adotando-se, para a tomada de decisão, novos métodos administrativos e gerenciais baseados na informatização da atividade de produção, reforçando a idéia de que a agricultura de precisão tende a se tornar cada vez mais comum nas propriedades rurais.

2.10.6. Variabilidade espacial aplicada às culturas agrícolas e ao solo

No Brasil vários trabalhos têm sido desenvolvidos buscando correlacionar a variabilidade espacial das propriedades do solo às produtividades das principais culturas agrícolas de interesse econômico. Assim, alguns são relatados.

Carvalho et al. (2002), aplicando a geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos (arado, grade e plantio direto), obtiveram os seguintes resultados: somente o pH apresentou baixa variabilidade nos três sistemas de preparo e nas duas profundidades estudadas (0 - 0,05 m e 0,05 - 0,20 m), as variáveis P e K apresentaram dependência espacial para a profundidade de 0 - 0,05 m, independentemente do sistema de preparo, entretanto, tais resultados não se repetiram na profundidade 0,05 - 0,20 m, o que indica que a dependência espacial varia conforme a profundidade de coleta da amostra de solo.

Montezano et al. (2006), analisando a variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogêneamente no município de Planaltina-GO, concluíram que os atributos do solo apresentaram de baixa a alta variabilidade e que o manejo da matéria orgânica do solo foi fundamental para melhorar a produtividade dos cultivos.

Molin et al. (2007), estudando a variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas, em Campos Novos Paulista-SP, relataram que a população de plantas normais e os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e a saturação por bases no solo tiveram efeito significativo sobre a produtividade de grãos.

Martins et al. (2009), estudando a correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Selvíria-MS, concluíram que a correlação linear entre a produtividade de grãos com os atributos do solo foi baixa. As de melhor correlação com a produtividade de grãos foram a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração, na camada de 0 - 0,10 m de profundidade. Contudo, do ponto de vista espacial, houve significativa correlação inversa entre a produtividade de grãos e a densidade do solo na camada de 0 - 0,10 m de profundidade. Portanto, dentre os atributos estudados, a densidade do solo avaliada na camada de 0 - 0,10 m apresentou-se como o melhor indicador da qualidade física daquele solo, quando destinado a estimar a produtividade de grãos de feijão.

Rosa Filho et al. (2009), trabalhando a variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto concluíram que, do ponto de vista linear e espacial, a elevada produtividade de grãos de soja pôde ser explicada em função da densidade do solo e da umidade volumétrica. A baixa variabilidade da maioria dos atributos do solo indicou que o sistema plantio direto é um sistema que proporciona a homogeneização do ambiente físico do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local de origem dos dados

O estudo foi realizado em Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, na Fazenda Experimental pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), entre as coordenadas geográficas 51°24'21'' e 51°24'33'' de Longitude Oeste e 20°20'56'' e 20°21'03'' de Latitude Sul, cuja altitude média é de 342 metros. A malha experimental foi instalada num LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico muito argiloso, conforme preceitos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA, 2006). Conforme preceitos de Köppen referidos por Vianello e Alves (2004), o clima da região é o tropical úmido megatérmico (Aw), com temperaturas elevadas, chuva no verão e seca no inverno. A região apresenta precipitação pluvial média anual de aproximadamente 1232 mm, temperatura média anual ao redor de 24,5°C e umidade relativa do ar entre 70 e 80% (CRUSCIOL et al., 2002). Contudo, as condições climáticas durante o período experimental podem ser visualizadas na Figura 2.

3.2. Caracterização inicial do solo estudado

Há pelo menos onze anos o solo onde o experimento foi implantado (Figura 3) vem sendo cultivado com a sucessão de culturas soja ou milho/feijão, semeadas no verão e inverno, respectivamente, em sistema plantio direto. Antes da instalação do experimento, entre os meses de março e abril de 2009, visando à caracterização inicial do solo, foram coletadas com trado de caneca de 0,08 m de diâmetro e 0,20 m de altura, 20 amostras simples de solo nas entre linhas de semeadura da cultura antecessora (milho) e em duas profundidades (0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m), das quais obteve-se uma amostra composta representativa para cada profundidade. As amostras compostas foram encaminhadas para análise química de rotina para fins de fertilidade do solo, realizada de acordo com Raij et al. (2001), no Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de

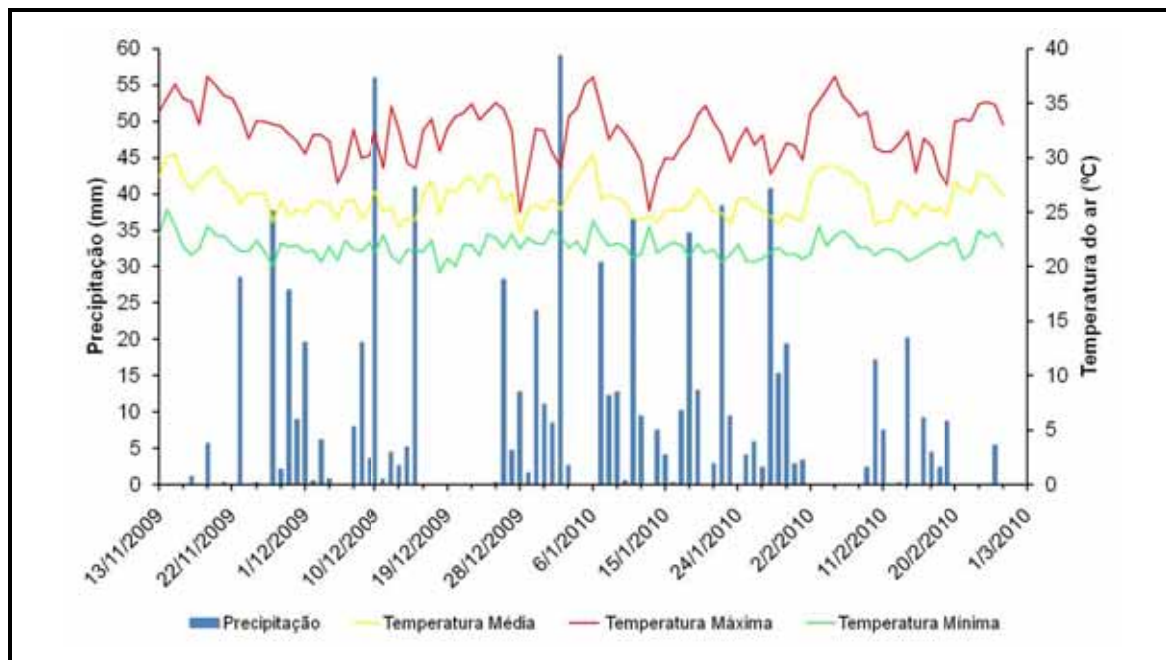


Figura 2: Precipitação pluvial e médias térmicas, obtidas na área experimental, durante o período de novembro de 2009 a março de 2010.



Figura 3: Aspecto da área experimental onde foi implantada a cultura do arroz sob pivô central.

Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira.

Desta forma, para cada profundidade do solo, as seguintes quantificações e determinações foram efetuadas: fósforo (**P**), matéria orgânica (**MO**), potencial hidrogeniônico (**pH** em CaCl_2 , em água e em KCl), ΔpH , potássio (K^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$), alumínio trocável (Al^{3+}), soma de bases (**S**), capacidade de troca catiônica (**T**), saturação por bases (**V%**) e saturação por alumínio (**m%**).

Também foi realizada a caracterização física do solo, sendo processadas conforme a Embrapa (1979), Kiehl (1979) e Stolf (1991). Assim, foram efetuadas as seguintes determinações: a) macroporosidade (**MA**), b) microporosidade (**MI**), c) porosidade total (**PT**), d) densidade no solo (**DS**), e) resistência mecânica à penetração (**RP**), f) umidade gravimétrica (**UG**) e g) umidade volumétrica (**UV**). Nos Quadros 4, 5 e 6, assim como na Figura 4, estão apresentadas as análises iniciais destes atributos físicos e químicos do solo.

3.3. Implantação, condução e colheita da cultura do arroz

A área na qual se instalou a cultura do arroz foi previamente dessecada com os herbicidas 2,4-D e glyphosate, nas doses respectivas de 1,0 e 4,0 L ha^{-1} (p.c.), com um volume de aplicação de 200 L ha^{-1} (Figura 5).

As sementes de arroz foram tratadas no momento da semeadura com o inseticida Cropstar (400 mL 100 kg^{-1} de sementes). Foi semeada a cultivar de arroz IAC 202, com linhas espaçadas de 0,34 m, em 14 de novembro, ano agrícola 2009/2010, em sistema plantio direto, na profundidade de 3 cm, com densidade de 230 sementes m^{-2} , o equivalente a 2300000 sementes ha^{-1} . Assim, foram semeadas 782 sementes em 10 metros de linha. Na adubação de semeadura consideraram-se os teores dos elementos químicos disponíveis no solo, determinados pela análise química inicial (Quadros 4 e 5), sendo aplicados 100 kg ha^{-1} da formulação 08-28-16 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$). Na adubação de cobertura foram aplicados 80 kg ha^{-1} de N, na forma amoniacal (sulfato de amônio), parcelado em 2 aplicações, metade aos 20 e o restante aos 44 dias após a semeadura (DAS), durante o estágio vegetativo da cultura.

Logo após a semeadura foi aplicado em área total o herbicida pendimetalina (500 g L^{-1}) na dose de 2,8 L ha^{-1} (p.c.) em um volume de aplicação de 200 L ha^{-1} , sucedida de uma irrigação com lâmina de 9 mm objetivando incorporar este produto ao solo para que o mesmo possa ter efeito sobre a emergência de plântulas invasoras, tanto

Quadro 4: Análise inicial de alguns atributos químicos (MO, pH, P e K⁺) para fins de fertilidade do solo estudado

Profundidade	Atributo químico ^(a)						
	MO	pH			Δ pH	Complexo sortivo	
		CaCl ₂	KCl	H ₂ O		P	K ⁺
m	g dm ⁻³					mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³
0 – 0,10	32	5,2	4,8	6,0	-1,2	34	6,6
0,10 – 0,20	24	4,8	4,4	5,5	-1,1	36	4,3

^(a) MO = matéria orgânica.

Quadro 5: Análise inicial de alguns atributos químicos (Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺+Al³⁺, Al³⁺, SB, CTC, V% e m%) para fins de fertilidade do solo estudado

Profundidade	Atributo químico ^(a)							V%	m%
	Complexo sortivo								
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	SB	CTC			
m	mmol _c dm ⁻³						%		
0 – 0,10	27	20	40	0,0	53,6	93,6	57,0	0,0	
0,10 – 0,20	19	13	47	4,0	36,3	83,3	44,0	10,0	

^(a) V% = índice de saturação por bases, m% = índice de saturação por alumínio.

Quadro 6: Análise inicial de alguns atributos físicos do solo estudado

Profundidade	Atributo físico ^(a)						
	Porosidade				Resistência à penetração/umidade		
	MA	MI	PT	DS	RP	UG	UV
m	m ³ m ⁻³				MPa	kg kg ⁻¹	m ³ m ⁻³
0 – 0,10	0,072	0,367	0,439	1,511	2,989	0,214	0,323
0,10 – 0,20	0,075	0,362	0,437	1,493	2,958	0,221	0,330
0,20 – 0,30	0,086	0,372	0,458	1,423	2,516	0,230	0,327

^(a) MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica.

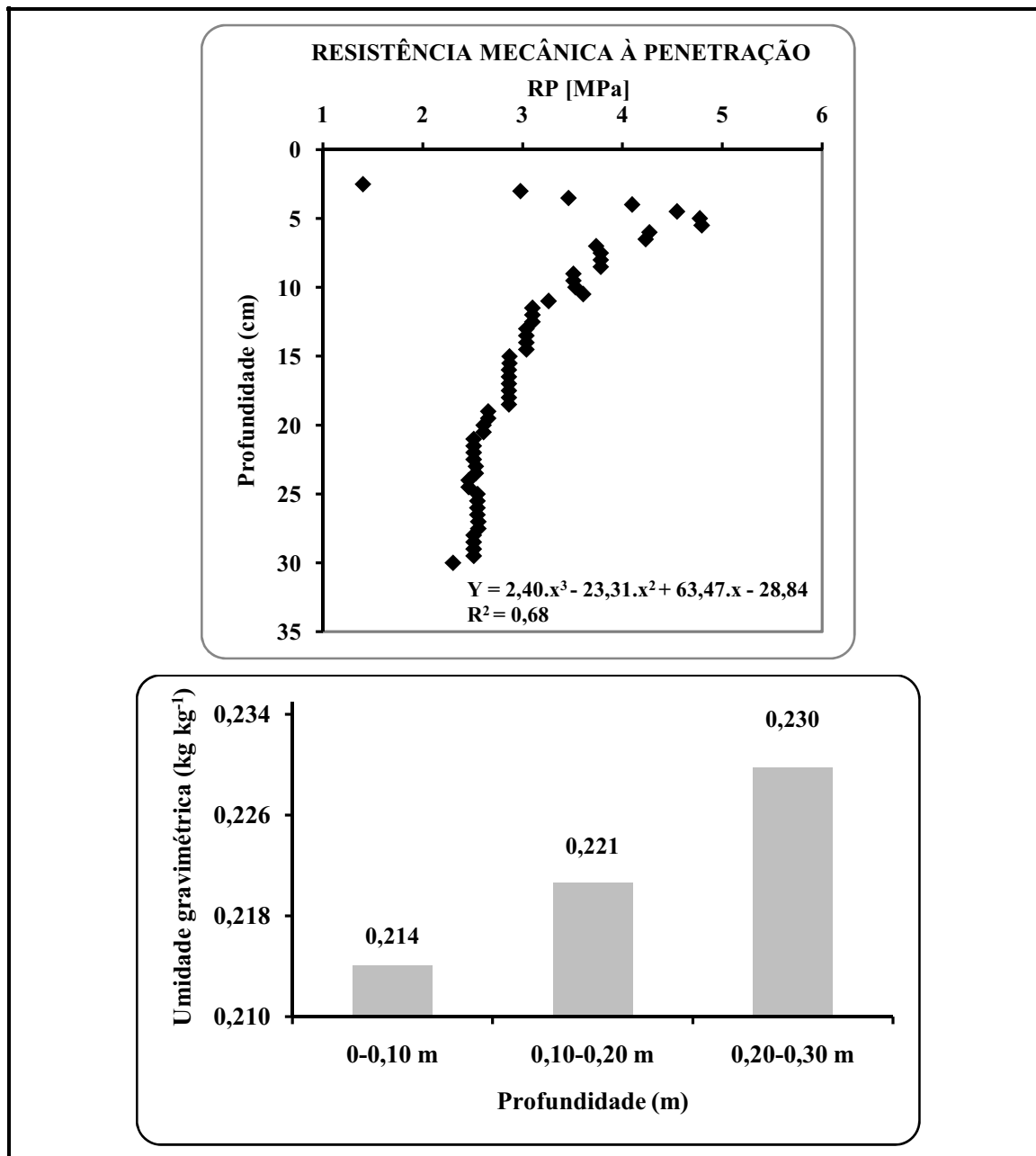


Figura 4: Curva da resistência mecânica à penetração e valores da umidade gravimétrica das três camadas estudadas do solo.



Figura 5: Imagem da área antes da dessecação (a), realizando a dessecação (b), tratamento de sementes com inseticida (c) e semeadura do arroz (d).

gramíneas quanto algumas folhas largas. Aos 20 DAS realizou-se uma aplicação em pós-emergência para o controle de plantas daninhas folhas largas, com metsulfurometílico (600 g kg^{-1}), na dose comercial de $2,5 \text{ g ha}^{-1} + 1,25 \text{ L ha}^{-1}$ de óleo mineral em um volume de aplicação de 200 L ha^{-1} .

Os demais manejos na condução da cultura foi de acordo com as instruções agrícolas para as principais culturas agrícolas e econômicas para o Estado de São Paulo, preconizado por Fahl et al. (1998). Aos 93 DAS (14/02/2009), por ocasião do enchimento de grãos, aplicou-se uma irrigação de 13 mm na área experimental, sendo a única irrigação necessária. A colheita foi efetuada manualmente quando 90% dos grãos apresentaram coloração típica de maduros, conforme metodologia proposta por Meira et al. (2005), em 01/03/2010, aos 108 DAS, sendo seguida de trilha mecânica e secagem por ventilação natural (Figura 6).

Conforme o exposto, a caracterização inicial do solo (física e química), a semeadura em sistema plantio direto, a implantação em malha geoestatística, objetivando a determinação dos alcances espaciais dos atributos estudados, com vistas à aplicação na agricultura de precisão e a utilização de irrigação suplementar por pivô central caracterizam o elevado nível tecnológico de manejo na condução da cultura.

3.5. Implantação e caracterização da malha experimental de campo

A implantação da malha geoestatística foi realizada logo após a emergência das plântulas de arroz, alocada numa área compreendida entre três terraços agrícolas (dois lançantes), com declividade do solo de $0,055 \text{ m m}^{-1}$. Foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas (Figura 7), efetuando-se o estaqueamento global da malha experimental logo após a emergência da cultura. Na dimensão x foram alocadas 6 linhas com 20 pontos amostrais em cada uma delas, de maneira que no interior da área foram distribuídos aleatoriamente 120 pontos amostrais em aproximadamente 30000 m^2 ($322 \text{ m} \times 93,35 \text{ m}$), com área aproximada de $250,5 \text{ m}^2$ para cada ponto amostral. Na coleta dos dados de planta e solo foi utilizado um nível ótico comum para retirar as coordenadas x e y, possibilitando a avaliação da dependência espacial entre os valores observados.

3.6. Coleta dos dados e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

Foram determinados os atributos do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral. Os atributos químicos do solo avaliados foram os teores de P e MO, valor de pH em CaCl_2 , teores de K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, Al^{+3} , e



Figura 6: Imagens da lavoura do arroz sob o sistema plantio direto no estágio vegetativo aos 11 DAS (a), aos 29 DAS (b) e aos 66 DAS (c), no início da emissão das panículas aos 78 DAS (d), no enchimento das espiguetas aos 92 DAS (e) e no ponto de maturação fisiológica/colheita aos 108 DAS (f).

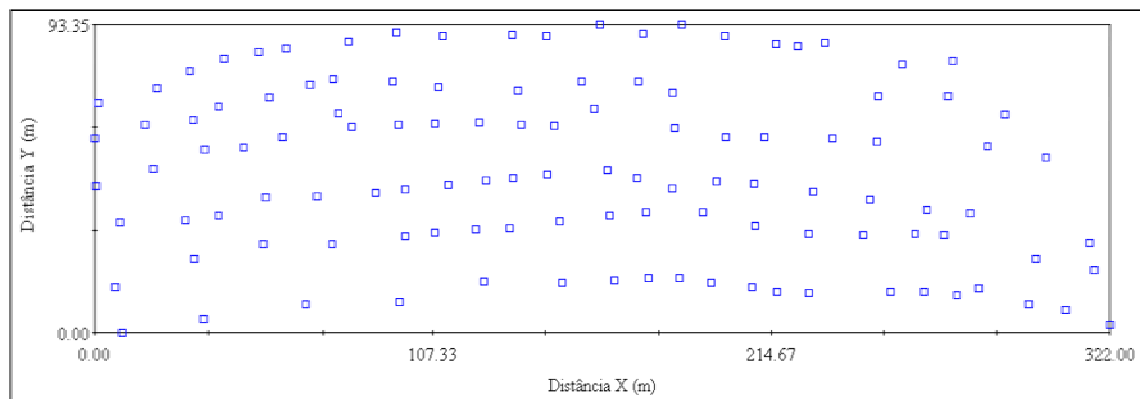


Figura 7: Esquema da malha experimental de campo com os 120 pontos amostrais.

valores de soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%), coletados na entre linha de semeadura do arroz e nas profundidades: 1) 0 - 0,10 m e 2) 0,10 - 0,20 m, utilizando para tal finalidade um trado de caneca, com diâmetro interno de 0,08 m e altura de 0,20 m, constituindo um volume de $1,005.10 \text{ m}^{-3}$. O solo foi seco ao ar (terra fina seca ao ar – TFSA), posteriormente passado por uma peneira com malha de 2 mm e as análises químicas foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira.

O pH foi determinado potenciométricamente em solução de CaCl_2 0,01M (BRASIL, 1979), e o carbono orgânico pelo método da combustão úmida, via colorimétrica, resultando no teor de matéria orgânica do solo à partir da seguinte expressão (RAIJ et al., 2001):

$$\text{MO} = \text{C} \times 1,724 \times 10 \dots\dots\dots(4)$$

onde: **MO** é o teor de matéria orgânica (g dm^{-3}) e **C** é o teor de carbono orgânico.

Os demais atributos químicos do solo também foram determinados conforme Raij et al. (2001). Os teores de **P** (mg dm^{-3}), **Ca**, **Mg** e **K** ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) disponíveis no solo foram quantificados através do método de extração pela resina trocadora de íons. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) determinada através do extrator acetato de cálcio 1 N, dada em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e os valores da **S**, **T**, **V%** e **m%** foram quantificados indiretamente através das seguintes expressões:

$$\text{S} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{T} = \text{S} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}) \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{V\%} = (\text{S}/\text{T}) \times 100 \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{m\%} = (\text{Al}^{+3} / \text{Al}^{+3} + \text{S}) \times 100 \dots\dots\dots(8)$$

onde: **S** é a soma de bases trocáveis e **T** é a capacidade de troca catiônica, ambos expressos em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e **V%** e **m%** são, respectivamente, a saturação por bases e a saturação por alumínio, expressas em porcentagem (%). Desta maneira, foram

analisados 24 atributos, a saber: a) profundidade 1: P1, MO1, pH1, K1, Ca1, Mg1, H+Al1, Al1, S1, T1, V%1 e m%1; e b) profundidade 2: P2, MO2, pH2, K2, Ca2, Mg2, H+Al2, Al2, S2, T2, V%2 e m%2.

Os atributos da planta avaliados foram: a) produtividade de grãos obtida (**PGO**), b) número de panículas por amostra (**NPA**), considerando cada amostra 1 m², c) número de espiguetas viáveis por panícula (**NEV**), d) número de espiguetas chochas por panícula (**NEC**), e) número de espiguetas total por panícula (**NET**) e f) massa de mil grãos (**MMG**), sendo determinados no Laboratório de Análise de Sementes da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. A área de coleta das plantas contidas no entorno do ponto amostral foi de 1,85 m², com 4 linhas de plantas (1,36 m x 1,36 m), sendo duas linhas de cada lado do ponto amostral.

A **PGO** foi calculada em função da pesagem dos grãos colhidos em cada ponto amostral (1,85 m²), fazendo uso de balança eletrônica digital com 5 g de precisão (FILIZOLA – BP15), e extrapolada para kg ha⁻¹ de grãos em casca. O **NPA** foi determinado mediante a contagem das panículas em um metro de linha em cada ponto amostral durante a fase de maturação. O **NEV**, **NEC** e o **NET** foram determinados mediante a coleta ao acaso de 15 panículas em cada ponto amostral durante a fase de maturação. A separação das espiguetas chochas das viáveis foi realizada por fluxo de ar. E por fim, na determinação da **MMG** foram utilizadas as espiguetas viáveis de cada ponto amostral, utilizando balança eletrônica digital com precisão de 0,001 g (ACATEC - BEM 0100). Com exceção da PGO, as demais determinações foram realizadas no Laboratório de Análises de Sementes da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira.

A umidade dos grãos foi determinada com aparelho próprio, de leitura digital e funcionamento a pilha (Determinador de Umidade *Multigrain*), sendo posteriormente corrigida para a condição de 13% (base úmida), segundo a seguinte expressão:

$$P_c = P \cdot [(1 - u_d) / (1 - u_{ob})] \dots\dots\dots (9)$$

onde: **P_c** representou a massa corrigida dos grãos de arroz (g/amostra); **P** a massa de campo não corrigida (g/amostra); **u_d** a umidade desejada como padrão (13%), e **u_{ob}** a umidade observada (%) nos grãos para cada ponto amostral.

3.7. Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva com o auxílio da estatística clássica, utilizando o Software SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), sendo calculados a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e análise da distribuição de frequência. Seguidamente, foram identificados os *outliers*, conforme identificação do gráfico de ramos e folhas, efetuando-se a substituição deles pelo valor médio dos circunvizinhos. Assim, para testar a hipótese da normalidade, ou da lognormalidade dos atributos, foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele, a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Na sequência, com o auxílio da planilha de cálculos Excel, foi montada a matriz de correlação, para posteriormente modelar as regressões de interesse para as combinações, duas a duas, entre os atributos estudados. Por outro lado, utilizando-se do pacote computacional SAS, foram efetuadas as regressões lineares múltiplas entre: 1) a PGO (variável dependente) em função dos componentes de produção do arroz (variáveis independentes), e 2) a PGO (variável dependente) em função dos atributos químicos pesquisados (variáveis independentes) para cada camada estudada do solo, no intuito de selecionar aqueles atributos que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores equações para estimar a PGO, por intermédio do *stepwise*, a 10% de probabilidade para a inclusão e exclusão de variáveis no modelo. O desempenho das equações foi analisado pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela contribuição de cada variável no modelo, estimada pelo aumento observado na soma de quadrado devido à regressão, quando da adição de cada variável no modelo, conforme sugestões de Maia et al. (2001).

Para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional *Gamma Design Software 7.0* (GS⁺, 2004). Assim, foram ajustados semivariogramas simples aos atributos da planta (PGO, NPA, NEV, NEC, NET e MMG) e aos do solo (P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, S, T, V% e m%). Sequencialmente ajustaram-se semivariogramas cruzados entre a PGO x atributos do solo. O objetivo foi definir os pares de melhor representatividade, ou seja, qual atributo (variável secundária) apresentou melhor correlação espacial explicativa da PGO (variável primária), em ambas as profundidades avaliadas.

Os ajustes dos semivariogramas (krigagem e cokrigagem), em função de seus modelos (linear, esférico, exponencial e gaussiano), foram efetuados pela seleção inicial de: 1) a menor soma dos quadrados dos desvios (**RSS**); 2) o maior coeficiente de determinação (**r²**), e 3) o maior avaliador da dependência espacial (**ADE**). A decisão final do modelo representante do ajuste foi por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou cokrigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (**C₀**), o patamar (**C₀+C**) e o alcance (**A₀**). A análise do avaliador da dependência espacial (**ADE**) foi conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada por GS⁺ (2004) conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C/(C+C_0)].100.....(10)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; **C+C₀** é o patamar. No entanto, a interpretação proposta para o **ADE** foi a seguinte: a) **ADE** < 20% = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) 20% ≤ **ADE** < 40% = baixa dependência (BA); c) 40% ≤ **ADE** < 60% = média dependência (ME); d) 60% ≤ **ADE** < 80% = alta dependência (AL), e e) 80% ≤ **ADE** < 100% = muito alta dependência (MA). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

3.7.1. Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer, pode-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica da regressão múltipla polinomial. A geoestatística é a ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos. Dessa forma, uma variável **Z**, que é distribuída ordenadamente no espaço **s**, é tida como variável regionalizada **Z(s)**. Portanto, pode ser representada espacialmente pelo semivariograma, partindo-se do pressuposto de que seja intrínseca, isto é, de que seus incrementos sejam estacionários. Entretanto, em muitos casos ela não satisfaz essa condição, de forma a caracterizar o fenômeno por exibir uma tendência, isto é, de não ser intrínseca e, portanto, não-estacionária. A Figura 8 ilustra tipicamente o semivariograma não-estacionário e o estacionário.

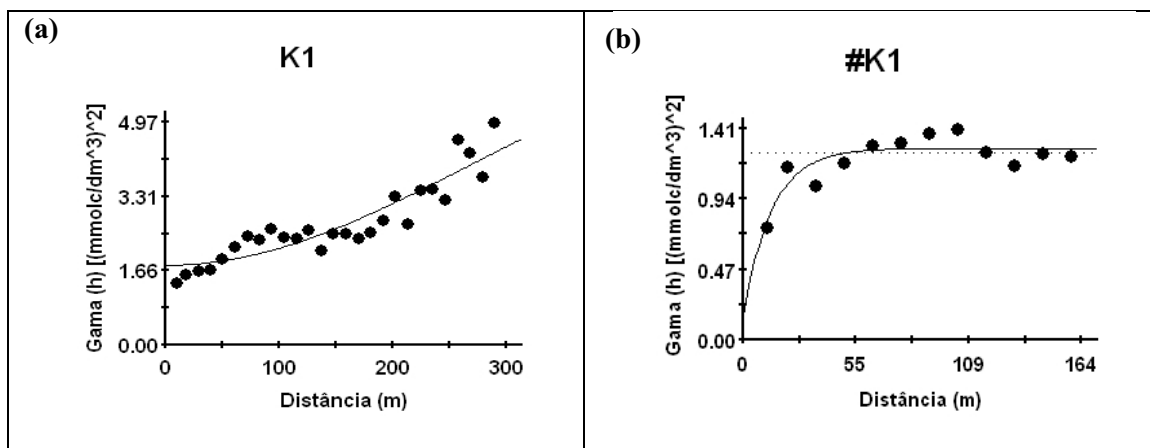


Figura 8. Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.

Assim, por se tratar de variável não-estacionária, se decompõe em:

$$Z(s) = t(s) + R(s) \dots \dots \dots (11)$$

onde: $t(s)$ é a tendência ou deriva e $R(s)$ é o resíduo (MATHERON, 1962; ARMESTO, 1999).

Segundo Davis (1986), a tendência $t(s)$ da variável $Z(s)$, que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x , y) do ponto amostral, na qual o componente aleatório vai ficar modelado no resíduo, pode ser obtida pela técnica da regressão múltipla polinomial, quando $t(s)$ é obtida em função dos valores das coordenadas cartesianas (x , y) do ponto. As expressões testadas são a linear, quadrática e a cúbica, relacionadas respectivamente nas equações a seguir:

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y \dots \dots \dots (12)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy \dots \dots \dots (13)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x \dots \dots \dots (14)$$

Dessa forma, a eleição da tendência $t(s)$, efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação (r^2). Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo $R(x,y)$, a partir da equação 15, efetuando-se:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \mathbf{Z}(\mathbf{x},\mathbf{y}) - \mathbf{t}(\mathbf{x},\mathbf{y}).....(15)$$

Portanto, com tais resíduos poderão ser efetuados os tratamentos necessários aos dados, tais como o ajuste do semivariograma e sua validação. Finalmente, a soma dos resíduos aos respectivos desvios resultará na estimativa da variável $\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$, com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme a equação 16:

$$\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}) + \mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}).....(16)$$

onde: $\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ é a estimativa da variável não-estacionária $\mathbf{Z}(\mathbf{s})$, $\mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ é a tendência da variável $\mathbf{t}(\mathbf{s})$, e $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Assim, calcula-se novamente o semivariograma, com os resíduos obtidos deste procedimento, e a designação dos atributos aos quais foi extraída a tendência é #atributo. Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e indicam na legenda do mapa de krigagem valores variando entre positivos e negativos, devido tais valores serem os resíduos, para que na legenda do mapa de krigagem possam aparecer os valores originais do atributo que se está estudando, efetua-se a interpolação do mapa de krigagem com os valores dos resíduos. Assim, quando é realizado este cálculo pelo programa GS^+ (2004), é gerado um arquivo Excel, que possui todas as interpolações calculadas para o número de vizinhos estipulado anteriormente. A partir do número ideal de vizinhos, estipulado pela validação cruzada prévia, pode-se calcular o $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$. Seguidamente, pode-se calcular a $\mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ pelo uso dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ e da $\mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ podem ser calculados os valores do atributo retrotransformados pelo uso da equação 16. Com isso, retorna-se ao GS^+ e efetua-se a krigagem com tais valores retrotransformados (£atributo), obtendo-se o mapa de krigagem final.

Após a exclusão da tendência nos dados dos atributos, estes ficaram precedidos do símbolo # quando referidos na análise semivariográfica e na validação cruzada (#ATR). Já quando referidos no mapa de krigagem e/ou cokrigagem ficaram precedidos por £ (£ATR).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise descritiva dos dados

4.1.1. Variabilidade dos atributos

4.1.1.1. Atributos da planta

De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), classificando-o como baixo ($CV \leq 10\%$), médio ($10\% < CV \leq 20\%$), alto ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alto ($CV > 30\%$). Desta forma, no Quadro 7 está contida a análise descritiva dos atributos pesquisados da planta.

Portanto, a produtividade de grãos de arroz obtida (PGO) e o número de espiguetas chochas por panícula (NEC) apresentaram alta variabilidade nos dados, com coeficiente de variação (CV) de 22,2% e 27,4%, respectivamente (Quadro 7). Para a PGO, o CV observado foi superior aos CVs dos trabalhos de Silva et al. (2002b), Carvalho-Pupatto et al. (2004), Farinelli et al. (2004) e Crusciol et al. (2007), onde os valores mencionados foram, respectivamente, de 14,9%; 16,7%; 10,3% e 13,2%. Por outro lado, corroboram com os de Neves et al. (2004), Cazetta et al. (2008) e Guimarães (2008), que mencionaram CVs de 22,6%, 28,3% e 21,5%, respectivamente, para a PGO. Em relação ao NEC, que é muito dependente dos tratamentos utilizados e condições de cultivo, Farinelli et al. (2004 e Guimarães (2008), descreveram CVs inferiores, sendo de 12,6% e 17,7%, respectivamente. Por outro lado, CVs semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2002b), Neves et al. (2004) e Cazetta et al. (2008), sendo eles de 23,1%, 24,3% e 29,5%, respectivamente.

Para os atributos número de panículas por amostra (NPA), número de espiguetas viáveis por panícula (NEV) e número de espiguetas total por panícula (NET), a variabilidade observada nos dados foi classificada como média, com CVs respectivos de 19,6%, 14,5% e 12,5% (Quadro 7). O CV do NPA foi superior ao CV relatado por Meira et al. (2005), que descreveram CV de 4,3%, contudo, corroboram aos estudos de

Quadro 7: Análise descritiva de alguns componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
PGO (kg ha ⁻¹)	5980	5933	2365	9117	1328	22,2	0,069	0,071	0,715	NO
NPA	260	256	129	379	50,96	19,6	-0,412	-0,002	0,778	NO
NEV	164	164	88	218	23,89	14,5	0,546	-0,319	0,344	NO
NEC	36	36	11	57	9,94	27,4	-0,394	-0,186	0,467	NO
NET	201	201	139	255	25,00	12,5	-0,279	-0,211	0,195	NO
MMG (g)	24,60	24,54	21,43	27,70	1,422	5,78	-0,404	-0,002	0,327	NO

^(a) PGO, NPA, NEV, NEC, NET e MMG são respectivamente a produtividade de grãos de arroz obtida, número de panículas por amostra, número de espiguetas viáveis por panícula, número de espiguetas chochas por panícula, número de espiguetas total por panícula e massa de mil grãos; (b) DF = distribuição de frequência, sendo NO do tipo normal.

Farinelli et al. (2004), Neves et al. (2004) e Guimarães (2008), cujos CVs respectivos foram 16,9%, 10,5% e 14,3%. Entretanto, foi inferior a variabilidade de Silva et al. (2002b) e Cazetta et al. (2008), que mencionaram CVs de 20,3% e 20,9%, respectivamente.

Pesquisando o NEV, CVs semelhantes (Quadro 7) foram mencionados por Farinelli et al. (2004), Neves et al. (2004), Cazetta et al. (2008) e Guimarães (2008), sendo de 11,0%, 19,8%, 17,9% e 10,8%, respectivamente, assim como o CV superior verificado por Silva et al. (2002b), que foi de 22,3%. Já para o atributo NET, valores inferiores do CV foram citados por Meira et al. (2005) e Guimarães (2008), sendo, respectivamente, de 2,3% e 8,4%. Entretanto, assemelha-se com o obtido por Silva et al. (2002b), com CV de 18,0%.

Ainda no Quadro 7, é possível constatar que a massa de mil grãos (MMG) apresentou baixa variabilidade nos dados (CV = 5,8%), fato corroborado por Farinelli et al. (2004), Meira et al. (2005), Cazetta et al. (2008) e Guimarães (2008), que ressaltaram CVs de 3,90%, 4,47%, 9,40% e 1,30%, respectivamente. Cabe salientar que a MMG é um atributo homogêneo, com menor interferência ambiental.

4.1.1.2. Atributos do solo

Analisando os Quadros 8 e 9, onde constam a análise descritiva dos dados químicos do solo nas profundidades de 0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, verifica-se que a variabilidade nos dados de pH1 e pH2 foi baixa, com CVs de 7,8% e 6,9%, respectivamente. No entanto, a MO1, MO2, T1 e T2 apresentaram média variabilidade nos dados, com CVs oscilando entre 11,1% e 14,7%. A H+Al1, H+Al2 e V%1 apresentaram alta variabilidade, com CVs de 22,4%, 24,0% e 29,1%, respectivamente. Para os demais atributos químicos do solo estudados (P1, P2, K1, K2, Ca1, Ca2, Mg1, Mg2, Al1, Al2, S1, S2, V%2, m%1 e m%2), os valores dos CVs constatados foram classificados como de variabilidade muito alta, oscilando entre 35,6% (S1) e 91,3% (m%1). A elevada variabilidade nos dados de Al foi devido à elevada frequência observada de valores nulos.

Segundo Hoerbe (2009), essas variabilidades nos atributos químicos do solo são conseqüências de complexas interações dos fatores e processos de sua formação. Além dos fatores e processos, práticas de manejo do solo e da cultura são causas adicionais de variabilidade, com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo (CORÁ, 1997). Carvalho et al. (2003) mencionaram que os fatores intrínsecos de formação que

Quadro 8: Análise descritiva de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
P1 (mg dm ⁻³)	20,7	16,5	6,0	66,0	11,96	57,82	0,532	0,268	0,060	LN
MO1 (g dm ⁻³)	25,6	25,0	19,0	34,0	3,30	12,93	-0,323	0,342	0,001	ND
pH1	4,9	4,8	4,2	6,0	0,38	7,80	0,096	0,666	0,001	ND
K1 (mmol _c dm ⁻³)	3,0	2,7	0,6	7,5	1,56	51,81	-0,449	-0,342	0,043	LN
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	21,5	20,0	10,0	41,0	7,76	36,13	-0,850	0,027	0,037	TL
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	15,3	14,0	6,0	31,0	5,61	36,69	-0,879	-0,020	0,024	TL
H+Al1 (mmol _c dm ⁻³)	49,8	50,0	16,0	80,0	11,14	22,40	0,510	-0,036	0,134	NO
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	5,7	4,0	0,0	19,0	4,91	86,32	-0,019	0,877	10 ⁻⁴	ND
S1 (mmol _c dm ⁻³)	39,8	37,9	18,1	75,6	14,17	35,60	-0,952	-0,027	0,024	TL
T1 (mmol _c dm ⁻³)	90,1	90,6	58,6	124,6	10,00	11,10	0,671	0,171	0,175	NO
V%1	43,7	43,4	19,4	74,4	12,74	29,13	-0,645	0,324	0,026	TN
m%1	14,6	10,1	0,0	49,9	13,28	91,27	-0,398	0,810	10 ⁻⁴	ND

^(a) P1, MO1, pH1, K1, Ca1, Mg1, H+Al1, Al1, S1, T1, V%1 e m%1 são respectivamente o fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio trocável, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e saturação por alumínio; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TL e ND respectivamente do tipo normal, lognormal, tendendo a lognormal e não determinada.

Quadro 9: Análise descritiva de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
P2 (mg dm ⁻³)	23,6	14,0	4,0	92,0	20,65	87,61	2,071	1,632	10 ⁻⁴	ND
MO2 (g dm ⁻³)	20,1	20,0	12,0	28,0	2,96	14,76	0,223	0,126	0,005	ND
pH2	4,6	4,6	4,0	5,6	0,32	6,91	0,605	0,726	5.10 ⁻⁴	ND
K2 (mmol _c dm ⁻³)	2,2	2,0	0,4	5,7	1,29	59,43	0,277	0,834	10 ⁻⁴	ND
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	14,3	13,0	4,0	32,0	5,43	38,05	0,314	-0,168	0,182	LN
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	9,9	9,5	3,0	24,0	4,07	41,19	-0,236	-0,278	0,141	LN
H+Al2 (mmol _c dm ⁻³)	58,3	58,0	15,0	98,0	14,00	24,01	0,678	-0,155	0,357	NO
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	11,6	10,0	0,0	31,0	7,35	63,36	0,558	-0,247	0,023	TL
S2 (mmol _c dm ⁻³)	26,4	25,2	7,8	56,0	9,77	37,02	-0,035	-0,209	0,661	LN
T2 (mmol _c dm ⁻³)	85,4	84,6	59,5	108,9	9,63	11,27	-0,144	0,023	0,756	NO
V%2	31,1	29,9	9,4	66,7	11,10	35,74	0,334	0,583	0,022	TN
m%2	31,4	30,7	0,0	76,9	19,17	61,11	-0,645	0,230	0,026	ND

^(a) P2, MO2, pH2, K2, Ca2, Mg2, H+Al2, Al2, S2, T2, V%2 e m%2 são respectivamente o fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio trocável, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e saturação por alumínio; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TL e ND respectivamente do tipo normal, lognormal, tendendo a lognormal e não determinada.

influenciam a variabilidade espacial dos atributos no solo são o material de origem, relevo, clima, organismos e tempo. Entretanto, no presente estudo, a variabilidade nos dados dos atributos possivelmente esteve associada ao efeito de cultivos sucessivos em SPD, com a adubação em linha e em diferentes espaçamentos.

Trabalhos com a cultura do arroz relacionando a variabilidade espacial dos atributos químicos no solo são escassos no Brasil. Porém, está disponível na literatura o estudo de Durigon (2007), que aplicou técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado por inundação em um PLANOSSOLO, no ano agrícola 2005/06. Assim, suas observações estão condizentes com este trabalho para os atributos pH, P, K, Al, Ca, Mg, m% e V%, pois os CVs encontrados pelo referido autor foram, respectivamente, de 4,5%, 76,4%, 33,4%, 53,8%, 35,3%, 42,7%, 50,1% e 30,8% (Quadros 8 e 9). Por outro lado, para a MO (23,3%), a H+Al (44,0%) e a T (32,4%), os CVs diferiram do presente estudo por serem superiores.

Ávila et al. (2008), pesquisando a variabilidade espacial da recomendação da calagem para culturas alternativas ao arroz em terras baixas, encontraram semelhante CV (3,6%) para o pH. Da mesma forma, Souza et al. (2010), analisando os atributos químicos de um ARGISSOLO, também relataram valores semelhantes de CV para os dados de pH e S (CVs de 8,4% e 37,1%, respectivamente), porém discordaram para a H+Al (CV de 18,9%).

4.1.2. Distribuição de frequência dos atributos

4.1.2.1. Atributos da planta

Para todos os atributos estudados, a distribuição de frequência foi do tipo normal (Quadro 7). O coeficiente de assimetria positiva foi 0,071 (PGO) e a negativa ficou entre -0,319 (NEV) e -0,002 (NPA). Para os coeficientes de curtose positiva os valores ficaram entre 0,069 (PGO) e 0,546 (NEV), e as negativas entre -0,412 (NPA) e -0,279 (NET). Desta forma, todos os atributos analisados foram significativos pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez seus valores oscilaram entre 0,195 e 0,778.

4.1.2.2. Atributos do solo

Somente os atributos químicos do solo H+Al1, H+Al2, T1 e T2 apresentaram distribuição de frequência do tipo normal (Quadros 8 e 9), com coeficientes de assimetria negativa entre -0,155 (H+Al2) e -0,036 (H+Al1), e positiva entre 0,023 (T2) e 0,171 (T1). Os coeficientes de curtose ficaram entre -0,144 (T2) e 0,678 (H+Al2),

sendo esses coeficientes significativos pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que os valores de probabilidade observados foram de 0,357 (H+Al₂) e 0,756 (T₂).

A V%1 e V%2 apresentaram distribuição de frequência tendendo a normal (Quadros 8 e 9). Para o P1, K1, Ca₂, Mg₂ e S₂, a distribuição de frequência observada foi do tipo lognormal, ao passo que para o Ca₁, Mg₁, S₁ e Al₂, foi tendendo à lognormal. Já, para os demais atributos químicos do solo (MO₁, pH₁, Al₁, m%₁, P₂, MO₂, pH₂, K₂ e m%₂), a distribuição de frequência obtida foi do tipo não determinada, demonstrando o efeito das adubações em linhas, assim como a calagem, em cultivos antecessores.

4.1.3. Valores médios dos atributos

4.1.3.1. Atributos da planta

Conforme o Quadro 7, o valor médio da PGO (5980 kg ha⁻¹) verificado no presente estudo foi superior à várias pesquisas envolvendo a cultivar IAC 202, dentre as quais, citam-se Arf et al. (2000), avaliando a influência da época de semeadura em arroz irrigado por aspersão, num LATOSSOLO VERMELHO ESCURO, onde alcançaram uma produtividade média de 4046 kg ha⁻¹; Silva et al. (2002b), pesquisando manejo e época de aplicação da adubação potássica em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso, obtiveram uma produtividade média de 4922 kg ha⁻¹; Carvalho-Pupatto et al. (2004), trabalhando num LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico, textura média, com a utilização de escória de alto-forno como forma de fornecimento de nutrientes, relataram uma produtividade média de 5491 kg ha⁻¹; Farinelli et al. (2004), estudando as características agronômicas do arroz em um LATOSSOLO VERMELHO e sob plantio direto, descreveram produtividade média de 3122 kg ha⁻¹; Neves et al. (2004), testando doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura em um LATOSSOLO VERMELHO-Escuro, obtiveram uma produtividade média de 4183 kg ha⁻¹; Meira et al. (2005), verificando a resposta à adubação nitrogenada e tratamento foliar com fungicidas, num LATOSSOLO VERMELHO-Escuro álico, conseguiram uma produtividade média de 4512 kg ha⁻¹.

A PGO também superou as produtividades de Silva (2006) que comparou períodos de interferência das plantas daninhas em um LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico e obteve uma produtividade média de 5032 kg ha⁻¹, na ausência total da interferência das plantas daninhas; Crusciol et al. (2007), que avaliaram a produtividade

de grãos de arroz irrigado por aspersão em consequência da época de semeadura em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, e relataram produtividade média de 4046 kg ha⁻¹; Guimarães (2008), que trabalhou com plantas de cobertura e adubação nitrogenada, em condições irrigadas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico argiloso de cerrado, e obteve produtividade média de 5367 kg ha⁻¹; Silva et al. (2009), que em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, pesquisando a produtividade sob condições de sequeiro, mencionaram produtividade média de 3312 kg ha⁻¹. Superou ainda a produtividade média nacional da safra 2009/10, que foi de 4073 kg ha⁻¹ (CONAB, 2010).

A elevada produtividade de grãos de arroz obtida neste estudo (Quadro 7), possivelmente está associada à precipitação pluviométrica total acumulada (822 mm), e regularmente distribuída, durante o período experimental (Figura 2), além de uma irrigação com lâmina de água de 13 mm, pois, conforme Medeiros et al. (2005), o teor de água no solo é um fator fundamental para o desempenho da cultura do arroz no sistema plantio direto. Tal precipitação (822 mm) é 37% superior ao necessário para o cultivo do arroz de terras altas, uma vez que a necessidade hídrica total está em torno de 600 mm (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA, 2003). Aliada à questão da precipitação, a disponibilidade de nutrientes à cultura também não foi fator limitante, pois estes estavam disponíveis na solução do solo em teores médios (P) e altos (K, Ca e Mg), conforme caracterização química inicial do solo (Quadros 4 e 5). Por outro lado, por mais que o solo apresentasse alta compactação nas primeiras camadas (Quadro 6), pôde-se constatar que a produtividade da cultura não se restringiu a esta, pois a condição de compactação do solo em SPD não acarreta maiores problemas à cultura do arroz, desde que no solo haja boas condições tanto de fertilidade quanto de disponibilidade hídrica (GUIMARÃES et al., 2006).

Em relação aos demais atributos da planta (NPA, NEV, NEC, NET e MMG), os valores médios observados foram 260, 164, 36, 201 e 24,60 g, respectivamente (Quadro 7), ficando o NEV bem próximo ao valor médio da cultivar (164), ao passo que para a MMG, o valor médio obtido superou em 12% a média da cultivar (22,00 g), conforme Bastos (2000). Arf et al. (2000) alcançaram uma produção de 219 panículas m⁻², o que foi inferior a este trabalho. Silva et al. (2002b) ressaltaram a obtenção de 214, 159, 62, 223 e 24,00 g para os respectivos atributos da planta NPA, NEV, NEC, NET e MMG, sendo que o NEV e a MMG apresentaram maior proximidade de valores quando

comparados ao presente estudo. Por outro lado, Farinelli et al. (2004) descreveram valores médios de 228, 116, 344 e 23,39 g para os atributos NEV, NEC, NET e MMG, respectivamente, discordando dos resultados da presente pesquisa, o que provavelmente deve-se ao fato destes autores trabalharem com doses de nitrogênio e potássio. Neves et al. (2004) relataram em seu estudo valores médios de 191 (NPA), 181 (NEV) e 46 (NEC), sendo que, com exceção do NPA, esses valores superaram os obtidos na presente pesquisa. Meira et al. (2005) descreveram valores de 195, 132 e 25,00 g para os respectivos atributos NPA, NET e MMG, sendo que somente o último atributo superou o valor obtido neste trabalho. Em contrapartida, Silva (2006) obteve valor inferior para o NPA (197). Já Guimarães (2008) constatou valores próximos para as características NPA, NEV, NEC, NET e MMG, cujos valores foram 156, 143, 42, 185 e 22,00 g, respectivamente. E por fim, Silva et al. (2009), que estudaram as características NPA, NET e MMG e obtiveram valores médios de 210, 187 e 21,5 g, respectivamente.

4.1.3.2. Atributos do solo

De acordo com os Quadros 8 e 9, os valores médios dos teores de P (P1 de 20,7 mg dm⁻³ e P2 de 23,6 mg dm⁻³), H+Al (H+Al1 de 49,8 mmol_c dm⁻³ e H+Al2 de 58,3 mmol_c dm⁻³), Al (Al1 de 5,7 mmol_c dm⁻³ e Al2 de 11,6 mmol_c dm⁻³) e m% (m%1 de 14,6% e m%2 de 31,4%), apresentaram-se diferentemente entre as profundidades analisadas, demonstrando um aumento dos respectivos teores em profundidade. O acréscimo nos valores de H+Al, Al e m% em profundidade pode ser atribuído aos menores efeitos das bases trocáveis nessas regiões, onde seus teores são restritos, uma vez que podem estar mais relacionadas à fontes orgânicas, ocorrentes na superfície do solo, concordando com Costa et al. (2007), que também observaram acréscimo do Al em profundidade. Em contrapartida, a redução da atividade do alumínio tóxico na superfície do solo em SPD pode estar relacionada à complexação orgânica por compostos solúveis presentes nos restos vegetais mantidos na superfície do solo (FRANCHINI et al., 1999).

O aumento da fração de P em profundidade (Quadros 8 e 9) pode ser atribuído ao SPD, pelo não revolvimento do solo, o que reduz o contato entre os colóides e o íon fosfato, amenizando as reações de adsorção, sobretudo pela adubação ter sido realizada na linha de semeadura, e ao P-orgânico oriundo da decomposição dos restos de raízes remanescentes ao longo do perfil do solo. Assim, esse reservatório de P-orgânico passa a constituir importante reserva de P-lábil para as plantas nas camadas mais profundas do

solo. Neste contexto, os valores médios dos teores de P1 e P2 estavam na faixa de média fertilidade, conforme limite de interpretação proposta por Raij et al. (1997) e apresentada no Quadro 1.

Para os demais atributos químicos do solo, houve um decréscimo dos teores em profundidade (Quadros 8 e 9), sendo esses a MO (MO1 de 25,6 g dm⁻³ e MO2 de 20,1 g dm⁻³), o pH (pH1 de 4,9 e pH2 de 4,6), o K (K1 de 3,0 mmol_c dm⁻³ e K2 de 2,2 mmol_c dm⁻³), o Ca (Ca1 de 21,5 mmol_c dm⁻³ e Ca2 de 14,3 mmol_c dm⁻³), o Mg (Mg1 de 15,3 mmol_c dm⁻³ e Mg2 de 9,9 mmol_c dm⁻³), a S (S1 de 39,8 mmol_c dm⁻³ e S2 de 26,4 mmol_c dm⁻³), a T (T1 de 90,1 mmol_c dm⁻³ e T2 de 85,4 mmol_c dm⁻³) e a V% (V%1 de 43,7 e V%2 de 31,1). Costa et al. (2007) também verificaram redução dos valores de pH, K, Ca e Mg em profundidade. Segundo estes autores, a diminuição do pH é decorrente da redução dos valores de bases trocáveis à medida que aumenta a profundidade do solo.

Uma das características marcantes do SPD é o aumento do teor de MO na camada superficial do solo (0 - 0,10 m) com o decorrer do tempo de implantação desse sistema, sendo reflexo da ausência de preparo do solo, da quantidade e da qualidade dos resíduos das culturas ao longo dos anos, o que influencia diretamente a disponibilidade dos nutrientes às plantas. A razão disso decorre do fato de a taxa de decomposição da palha mantida na superfície do solo ser menor do que se fosse incorporada ao solo. Em consequência, a alteração no teor de matéria orgânica, tanto em quantidade como em qualidade, tem implicações graduais nas alterações do pH (associada aos seus teores de cátions de reação básica e carbono orgânico solúvel), na toxidez de alumínio, por meio de hidrólise ou complexação por ácidos orgânicos (MIYAZAWA et al., 2000), na dinâmica do fósforo e de outros nutrientes. Em relação ao K, em virtude de sua reciclagem como resultado do acúmulo dos resíduos das culturas em rotação, ocorre uma maior disponibilidade nos primeiros 0,10 m de solo. Isso permite que possam ser adicionadas doses menores na adubação de manutenção, sem que a produtividade das culturas seja afetada.

Os valores observados para o pH1 e pH2 (Quadros 8 e 9), classificam o solo como de acidez alta (Quadro 3). Para o K1 e K2 foram verificados teores de média disponibilidade (Quadros 1, 8 e 9) e para as demais bases trocáveis do solo (Ca1, Ca2, Mg1 e Mg2), houve uma alta disponibilidade no complexo coloidal (Quadros 2, 8 e 9). Por outro lado, a V%1 e V%2 estavam na classe de baixa saturação por bases (Quadros 3, 8 e 9). Contudo, a produtividade do arroz de terras altas não foi afetada uma vez que

nenhum dos elementos essenciais ao desenvolvimento normal da cultura estava em teor deficiente no solo.

De uma maneira geral, os resultados indicaram variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, com teores classificados de baixo a alto, segundo os limites de interpretação propostos por Raij et al. (1997). Como exemplos, destacam-se a saturação por bases (teor baixo) e os teores de cálcio e magnésio (teor alto), os quais são atributos da fertilidade do solo utilizados como critérios para definição da necessidade e da quantidade de corretivos para neutralizar a acidez do solo. Por outro lado, o SPD proporcionou boa disponibilidade de nutrientes às plantas, corroborando os resultados obtidos por Caires et al. (2003), ao afirmarem que o SPD melhora a disponibilidade de nutrientes, uma vez que, ao não promover o revolvimento do solo, ele promove acúmulo dos nutrientes em camadas mais superficiais.

Os resultados verificados permitem inferir que a caracterização química inicial do solo (Quadros 4 e 5) realizada com a coleta de 20 amostras simples, não foi o suficiente para caracterizá-lo, uma vez que os valores médios dos atributos químicos diferiam consideravelmente quando da realização da amostragem final com 120 pontos amostrais (Quadros 8 e 9), o que leva a confirmar a importância das técnicas geoestatísticas no estudo da variabilidade do solo.

4.2. Análise de regressão entre os atributos

4.2.1. Regressão linear simples

4.2.1.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos

Estão apresentadas nos Quadros 9, 10 e 11, as matrizes de correlação linear simples entre os atributos da cultura do arroz (PGO, NPA, NEV, NEC, NET e MMG) e os do solo (P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, S, T, V% e m%).

4.2.1.1.1. Atributos da planta *versus* atributos da planta

Dentre as correlações dos atributos da planta (Quadro 10), foram significativos os pares PGO x NPA ($r = 0,229^*$), PGO x NEV ($r = 0,475^{**}$), PGO x NEC ($r = -0,232^*$), PGO x NET ($r = 0,362^{**}$), NEV x NPA ($r = 0,187^*$), NET x NEV ($r = 0,918^{**}$), NET x NEC ($r = 0,304^{**}$) e MMG x NEC ($r = -0,445^{**}$). Portanto, ficou evidenciado que o NEV foi o componente da produção que proporcionou o maior incremento da PGO. Fageria (2000) também relatou correlação significativa da produtividade de grãos de arroz em função do número de panículas ($r = 0,570^{**}$) e Guimarães et al. (2006) correlacionaram positiva e significativamente a produtividade

Quadro 10: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)				
	PGO	NPA	NEV	NEC	NET
NPA	0,229*				
NEV	0,475**	0,187*			
NEC	-0,232*	-0,142	-0,099		
NET	0,362**	0,123	0,918**	0,304**	
MMG	0,150	-0,023	0,018	-0,445**	-0,160

^(a) Vide Quadro 7; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

de grãos com o número de espiguetas por panícula.

4.2.1.1.2. Atributos da planta *versus* atributos do solo

As correlações entre a PGO e os atributos químicos do solo (Quadros 11 e 12) apresentaram significância para os pares: 1) PGO x K1 ($r = -0,317^{**}$), 2) PGO x Ca1 ($r = -0,232^{*}$), 3) PGO x Mg1 ($r = -0,256^{**}$), 4) PGO x S1 ($r = -0,265^{**}$), 5) PGO x T1 ($r = -0,206^{*}$), 6) PGO x V%1 ($r = -0,254^{**}$), 7) PGO x K2 ($r = -0,217^{*}$) e 8) PGO x T2 ($r = -0,251^{*}$). Como podem ser observadas, tais correlações apresentaram comportamento inverso, indicando que com o aumento dos teores dos nutrientes no solo (causa), haverá um declínio da PGO (efeito), sendo o inverso verdadeiro. Hoerbe (2009), manejando a cultura do arroz irrigado utilizando técnicas de agricultura de precisão em um PLANOSSOLO HIDROMÓRFICO Eutrófico Típico, observou correlações inversas entre: 1) PGO x K ($r = -0,409^{*}$), 2) PGO x V% ($r = -0,432^{*}$) e 3) PGO x Mg ($r = -0,734^{*}$), corroborando as obtidas por este estudo.

Diante dos preceitos da fertilidade do solo, as correlações inversas observadas entre a PGO e os atributos químicos do solo (K1, Ca1, Mg1, S1, T1, V%1, K2 e T2), não são comuns. Contudo, podem ter ocorrido em virtude de o experimento ter sido conduzido em uma área sob pivô central, onde a disponibilidade das bases Ca, Mg e K não foi limitante para a cultura do arroz, uma vez que esses cátions estavam prontamente disponíveis na solução do solo em teores altos (RAIJ et al., 1997), conforme caracterização química inicial do solo (Quadros 4 e 5), impossibilitando a avaliação do efeito-resposta.

Conforme os Quadros 11 e 12, as correlações entre o NPA e os atributos do solo apresentaram significância para os pares: 1) NPA x MO1 ($r = -0,202^{*}$), 2) NPA x K1 ($r = -0,223^{*}$), 3) NPA x Ca1 ($r = -0,200^{*}$), 4) NPA x Mg1 ($r = -0,249^{**}$), 5) NPA x S1 ($r = -0,234^{**}$), 6) NPA x T1 ($r = -0,225^{*}$), 7) NPA x V%1 ($r = -0,200^{*}$), 8) NPA x Mg2 ($r = -0,197^{*}$), 9) NPA x S2 ($r = -0,191^{*}$) e 10) NPA x T2 ($r = -0,214^{*}$). O NEV apresentou correlação exclusiva para a profundidade de 0 - 0,10 m, sendo os pares: 1) NEV x Ca1 ($r = -0,191^{*}$), 2) NEV x S1 ($r = -0,194^{*}$) e 3) NEV x V%1 ($r = -0,206^{*}$). Por outro lado, o NEC correlacionou-se com: 1) NEC x K1 ($r = 0,209^{*}$), 2) NEC x T1 ($r = 0,196^{*}$), 3) NEC x K2 ($r = 0,182^{*}$) e 4) NEC x T2 ($r = 0,247^{**}$). Para o NET foi observada a correlação: 1) NET x V%1 ($r = -0,190^{*}$). E por fim, a MMG correlacionou-se com os pares: 1) MMG x K1 ($r = -0,264^{**}$), 2) MMG x T1 ($r = -0,320^{**}$), 3) MMG x K2 ($r = -0,217^{*}$) e 4) MMG x T2 ($r = -0,192^{*}$). Nestes casos, os efeitos foram semelhantes e

Quadro 11: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

Atributos ^(a)	Atributos/Coefficiente de correlação ^(b)																
	PGO	NPA	NEV	NEC	NET	MMG	P1	MOI	pH1	K1	Ca1	Mg1	H+Al1	Al1	SI	T1	V%1
P1	-0,162	-0,067	-0,055	0,058	-0,030	-0,117											
MOI	-0,080	-0,202*	0,007	0,150	0,066	-0,123	-0,076										
pH1	-0,130	-0,101	-0,109	-0,036	-0,106	-0,094	-0,108	0,241**									
K1	-0,317**	-0,223*	-0,184	0,209*	-0,092	-0,264**	0,074	0,358**	0,499**								
Ca1	-0,232*	-0,200*	-0,191*	0,026	-0,172	-0,113	-0,084	0,426**	0,891**	0,515**							
Mg1	-0,256**	-0,249**	-0,169	0,092	-0,126	-0,170	-0,082	0,451**	0,878**	0,616**	0,946**						
H+Al1	0,141	0,105	0,171	0,096	0,102	-0,073	0,217*	-0,113	-0,901**	-0,327**	-0,736**	-0,714**					
Al1	0,140	0,095	0,145	-0,009	0,136	0,046	0,203*	-0,334**	-0,858**	-0,478**	-0,803**	-0,791**	0,853**				
SI	-0,265**	-0,234**	-0,194*	0,074	-0,156	-0,157	-0,069	0,451**	0,894**	0,637**	0,982**	0,984**	-0,725**	-0,808**			
T1	-0,206*	-0,225*	-0,105	0,196*	-0,022	-0,320**	0,215*	0,426**	0,414**	0,491**	0,601**	0,624**	-0,070	-0,253**	0,635**		
V%1	-0,254**	-0,200*	-0,206*	0,018	-0,190*	-0,077	-0,137	0,378**	0,945**	0,569**	0,954**	0,947**	-0,866**	-0,892**	0,962**	0,431**	
m%1	0,129	0,134	0,184	-0,043	0,159	0,082	0,163	-0,390**	-0,858**	-0,513**	-0,832**	-0,827**	0,816**	0,986**	-0,841**	-0,339**	-0,909**

^(a) Vide Quadros 7 e 8; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

Quadro 12: Matriz de correlação entre alguns atributos da produtividade do arroz de terras altas e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

Atributos ^(a)	Atributos/Coefficiente de correlação ^(b)												
	PGO	NPA	NEV	NEC	NET	MMG	P2	MO2	pH2	K2	Ca2	Mg2	H+Al2
P2	-0,127	0,025	-0,156	0,098	-0,110	-0,007							
MO2	0,033	-0,122	0,012	0,078	0,042	-0,117	-0,023						
pH2	-0,071	-0,136	-0,119	-0,125	-0,164	-0,032	-0,445**	0,293**					
K2	-0,217*	-0,173	-0,101	0,182*	-0,025	-0,217*	0,096	0,200*	0,244**				
Ca2	-0,044	-0,153	-0,121	-0,092	-0,152	-0,020	-0,291**	0,538**	0,885**	0,255**			
Mg2	-0,093	-0,197*	-0,131	0,053	-0,104	-0,132	-0,340**	0,459**	0,874**	0,271**	0,910**		
H+Al2	-0,070	0,035	0,102	0,104	0,108	-0,094	0,440**	-0,021	-0,828**	-0,063	-0,681**	-0,678**	
Al2	-0,040	0,057	0,067	0,107	0,107	0,047	0,457**	-0,305**	-0,889**	-0,251**	-0,822**	-0,801**	0,889**
S2	-0,096	-0,191*	-0,134	-0,003	-0,129	-0,088	-0,293**	0,516**	0,893**	0,388**	0,973**	0,963**	-0,677**
T2	-0,251*	-0,214*	-0,018	0,247**	0,081	-0,192*	0,316**	0,488**	-0,203*	0,281**	0,111	0,114	0,558**
V%2	-0,028	-0,122	-0,123	-0,064	-0,143	-0,053	-0,382**	0,358**	0,953**	0,310**	0,932**	0,925**	-0,827**
m%2	0,016	0,104	0,095	0,050	0,111	0,093	0,406**	-0,394**	-0,901**	-0,324**	-0,885**	-0,873**	0,835**
													-0,954**

^(a) Vide Quadros 7 e 9; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

compensativos em virtude de serem componentes da produção.

4.2.1.1.3. Atributos do solo *versus* atributos do solo

As correlações entre os atributos químicos do solo estão apresentadas nos Quadros 11 e 12. Com exceção da H+Al1 e H+Al2, a MO correlacionou-se com todos os demais atributos químicos do solo. As correlações positivas estabelecidas foram: 1) MO1 x pH1 ($r = 0,241^{**}$), 2) MO1 x K1 ($r = 0,358^{**}$), 3) MO1 x Ca1 ($r = 0,426^{**}$), 4) MO1 x Mg1 ($r = 0,451^{**}$), 5) MO1 x S1 ($r = 0,451^{**}$), 6) MO1 x T1 ($r = 0,426^{**}$), 7) MO1 x V%1 ($r = 0,378^{**}$), 8) MO2 x pH2 ($r = 0,293^{**}$), 9) MO2 x K2 ($r = 0,200^{*}$), 10) MO2 x Ca2 ($r = 0,538^{**}$), 11) MO2 x Mg2 ($r = 0,459^{**}$), 12) MO2 x S2 ($r = 0,516^{**}$), 13) MO2 x T2 ($r = 0,488^{**}$) e 14) MO2 x V%2 ($r = 0,358^{**}$), indicando que um aumento no teor de MO causará elevação nos valores dos demais atributos químicos do solo, uma vez que a MO é fonte de nutrientes e eleva a T do solo, concordando com Montezano et al. (2006), que verificaram correlações significativas entre MO x Ca ($r = 0,56^{**}$), MO x S ($r = 0,46^{**}$) e MO x T ($r = 0,88^{**}$), e Souza et al. (2008a), que relataram as correlações MO x Ca ($r = 0,40^{*}$) e MO x Mg ($r = 0,42^{*}$).

Por outro lado, correlações inversas foram estabelecidas neste estudo, sendo: 15) MO1 x Al1 ($r = -0,334^{**}$), 16) MO1 x m%1 ($r = -0,390^{**}$), 15) MO2 x Al2 ($r = -0,305^{**}$) e MO2 x m%2 ($r = -0,394^{**}$), sugerindo que uma elevação no teor de MO implicará em decréscimo nos valores desses atributos da acidez do solo, ocorrido por efeito complexante. Tanto as correlações positivas quanto as negativas, foram significativas, em sua maioria, a 1% de probabilidade.

Ao promover o aumento da T, a MO beneficia a retenção de cátions trocáveis (Ca, Mg, K) mediante trocas com o H^{+} dos grupos funcionais orgânicos, aumentando a V% no complexo coloidal. Desta forma, ressalta-se a importância do SPD, pois ao reduzir a velocidade de oxidação da MO, contribui para o aumento da V% no complexo catiônico e a conseqüente melhoria da fertilidade do solo. Neste sentido, Nicolodi et al. (2004) salientaram ser provável que, no solo cultivado por longo período no SPD, as interações da MO com os demais atributos químicos do solo, manifestem-se mais intensamente, influenciando a disponibilidade e a absorção de nutrientes e a produtividade das culturas, principalmente em cultivos em SPD após 5 anos.

Conforme os Quadros 11 e 12, o pH do solo correlacionou-se de maneira direta com todas as bases trocáveis, estabelecendo as seguintes correlações: 1) pH1 x K1 ($r = 0,499^{**}$), 2) pH1 x Ca1 ($r = 0,891^{**}$), 3) pH1 x Mg1 ($r = 0,878^{**}$), 4) pH2 x K2 ($r = 0,244^{**}$), 5) pH2 x Ca2 ($r = 0,885^{**}$) e 6) pH2 x K2 ($r = 0,874^{**}$), indicando que com a

elevação do pH, houve também maior disponibilidade dessas bases no complexo de troca do solo, com reposição na solução, fonte direta de nutrientes às plantas. Da mesma forma, as correlações: 7) pH1 x S1 ($r = 0,894^{**}$), 8) pH1 x V%1 ($r = 0,945^{**}$), 9) pH2 x S2 ($r = 0,893^{**}$) e 10) pH2 x V%2 ($r = 0,953^{**}$), foram diretas e significativas a 1% de probabilidade. Contudo, tal afirmação não é verdadeira para os seguintes pares: 11) pH1 x H+Al1 ($r = -0,901^{**}$), 12) pH1 x Al1 ($r = -0,858^{**}$), 13) pH1 x m%1 ($r = -0,858^{**}$), 14) pH2 x H+Al2 ($r = -0,828^{**}$), 15) pH2 x Al2 ($r = -0,889^{**}$) e 16) pH2 x m%2 ($r = -0,901^{**}$), apesar de também serem significativas a 1% de probabilidade, pois o tipo de correlação firmada foi inversa, sugerindo que com o aumento do pH haverá uma diminuição da H+Al, do Al, e por consequência, da m%, sendo o inverso verdadeiro. Montezano et al. (2006) descreveram correlações positivas entre pH x Ca ($r = 0,35^{**}$), pH x Mg ($r = 0,53^{**}$), pH x S ($r = 0,44^{**}$), pH x V% ($r = 0,75^{**}$) e inversa entre pH x H+Al ($r = -0,57^{**}$), corroborando esta pesquisa.

A correlação inversa obtida entre pH x Al é amplamente discutida em literaturas específicas, uma vez que o cátion Al compete e tem preferência em função de sua valência $^{+3}$, pelo sítio de adsorção nas cargas negativas dos colóides minerais e/ou orgânicos em relação a outros cátions como o K^{+} , o Ca^{+2} e o Mg^{+2} , o que pode ser verificado pelas correlações obtidas neste trabalho entre tais elementos: 1) Al1 x K1 ($r = -0,478^{**}$), 2) Al1 x Ca1 ($r = -0,803^{**}$), 3) Al1 x Mg1 ($r = -0,791^{**}$), 4) Al2 x K2 ($r = -0,251^{**}$), 5) Al2 x Ca2 ($r = -0,822^{**}$) e 6) Al2 x Mg2 ($r = -0,801^{**}$). Santos et al. (2010) também descreveram correlação inversa entre Al x K ($r = -0,31^{*}$). No entanto, para as correlações Al x Ca ($r = 0,40^{*}$) e Al x Mg ($r = 0,43^{*}$), o comportamento foi direto, diferindo do presente trabalho. Da mesma forma, a H+Al, em virtude da “herança” que carrega do Al, correlacionou-se negativamente com as bases: 1) H+Al1 x K1 ($r = -0,327^{**}$), 2) H+Al1 x Ca1 ($r = -0,736^{**}$), 3) H+Al1 x Mg1 ($r = -0,714^{**}$), 4) H+Al2 x Ca2 ($r = -0,681^{**}$) e 5) H+Al2 x Mg2 ($r = -0,678^{**}$).

As bases trocáveis K1, Ca1 e Mg1 também se correlacionaram, diretamente, com a S1, com a T1 e com a V%1 (Quadros 11 e 12), o que era esperado, pois o aumento das bases trocáveis tende a elevar a S, a T e a V% pela estreita relação de dependência co-existente. No entanto, o Ca2 e o Mg2 não se correlacionaram com T2, mas se correlacionaram com S2 e V%2. Santos et al. (2010) também relataram correlações entre Ca x T ($r = 0,82^{*}$), Mg x T ($r = 0,55^{*}$), Ca x V% ($r = 0,40^{*}$) e Mg x V% ($r = 0,50^{*}$), para a profundidade de 0 - 0,15 m, corroborando este estudo.

4.2.1.2. Regressão linear simples entre os atributos

A principal equação de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, planta *versus* planta, está apresentada na Figura 9, eleita em função da sua importância agronômica bem como por apresentar o maior coeficiente de correlação quando considerada a variável dependente PGO, conforme a matriz de correlação apresentada no Quadro 10 (PGO x NEV; $r = 0,475^{**}$).

Desta forma, tal equação modelada foi representada pelo modelo polinomial do tipo potencial direta (Figura 9), cujo coeficiente de correlação apresentou valor considerável, tendo em vista o elevado número de observações ($r = 0,502^{**}$; $n = 120$). Assim, 50,2% da variação da PGO puderam ser explicadas pela variação do NEV. Explorando a regressão obtida, é possível observar que variando o NEV entre 88 e 218, a estimativa da PGO passará de 3629 kg ha⁻¹ a 7298 kg ha⁻¹, respectivamente. Analogamente, ao considerar o valor médio do NEV (164) obtido neste experimento, poderá ser estimado a PGO de 5862 kg ha⁻¹, valor este próximo da PGO obtida nesta pesquisa (Quadro 7). Neste contexto, Guimarães et al. (2006), avaliando o comportamento da cultivar de arroz de terras altas canastra em SPD, também modelaram a regressão $PGO=f(NEV)$, de comportamento linear direto, explicando 68% da variação da produtividade do arroz ($R^2 = 0,68^{**}$). Estes autores tiveram a produtividade do arroz variando entre 3067 kg ha⁻¹ e 4691 kg ha⁻¹ quando o número de espiguetas variou entre 95 e 175. Por outro lado, a produtividade média foi estimada em 3583 kg ha⁻¹ quando o valor médio de espiguetas (120,4) foi considerado na regressão linear obtida, valor próximo a produtividade média obtida em seu estudo (3476 kg ha⁻¹).

4.2.1.3. Regressão linear múltipla entre os atributos (*stepwise*)

No Quadro 13 estão apresentadas as regressões lineares múltiplas ajustadas para estimar a produtividade de grãos de arroz (PGO) em função dos componentes de produção e dos atributos do solo nas duas profundidades estudadas, o número de observações e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2). Com relação aos componentes de produção, somente o NEV explicou 22,4% da PGO ($R^2 = 0,224$). Este resultado está de acordo com aquele apresentado no Quadro 10, que evidencia a maior correlação da PGO com o NEV. Por outro lado, a combinação do NEV e NEC explicou 25,9% da PGO, demonstrando um pequeno acréscimo quando o modelo da regressão adicionou o NEC. Contudo, uma terceira seleção de componentes de produção com maior precisão na explicação da PGO, adicionou o NET, sendo que esta equação conseguiu explicar 28,8% da PGO, representando um acréscimo em R^2 de 6,4% quando

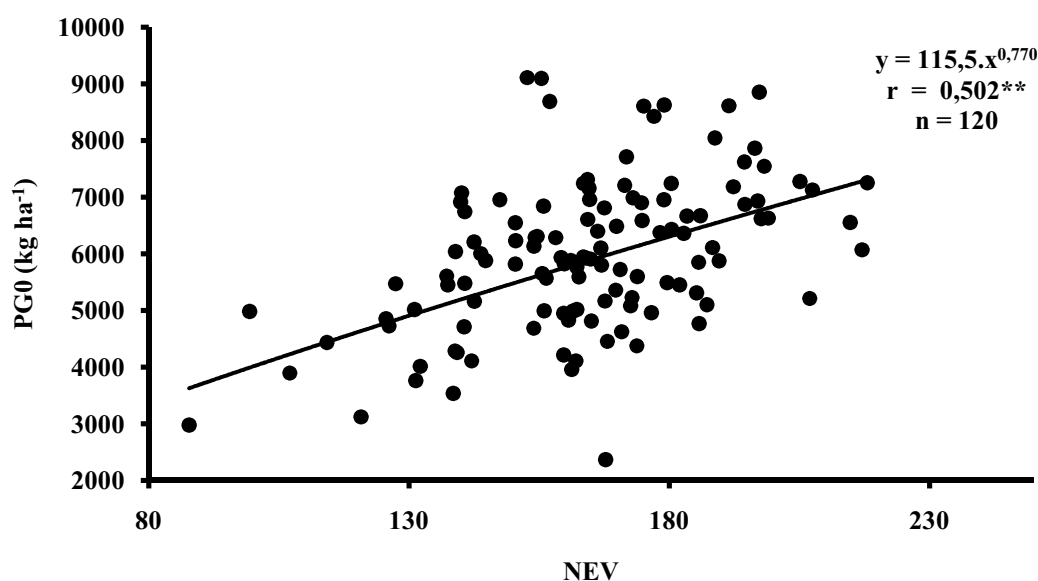


Figura 9: Equação de regressão da produtividade de grãos de arroz de terras altas em função do número de espiguetas viáveis por panícula em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

Quadro 13. Equações de regressão linear múltipla obtidas pelo método *Stepwise*, número de observações (N) e coeficiente de determinação (R^2) para as variáveis independentes (planta e solo)

Variáveis independentes	Equação de Regressão	N	R^2
Planta	$PGO = 1661,20 + 26,29.NEV^{**}$	120	0,224***
	$PGO = 2740,97 + 25,29.NEV^{***} - 25,20.NEC^{**}$	120	0,259***
	$PGO = 2754,30 - 411,55.NEV^{**} - 461,07.NEC^{**} + 436,59.NET^{**}$	120	0,288***
Solo (0 – 0,10 m)	$PGO = 6793,06 - 270,36.K1^{***}$	120	0,100***
Solo (0,10 – 0,20 m)	$PGO = 8940,74 - 34,66.T2^{***}$	120	0,063***
	$PGO = 8274,89 + 91,85.MO2^{**} - 48,43.T2^{***}$	120	0,095***
	$PGO = 13593 + 153,36.MO2^{***} - 1112,46.pH2^{***} - 65,11.T2^{***}$	120	0,149***
	$PGO = 23432 + 105,01.MO2^{*} - 3183,85.pH2^{***} + 139,72.Ca2^{**} - 80,52.T2^{***}$	120	0,184***

* Significativo à 10%; ** Significativo à 5%; *** Significativo à 1% de probabilidade.

comparada a equação que considera somente o NEV.

Para a profundidade de 0 a 0,10 m, somente o K1 explicou a variação na PGO (Quadro 13), com coeficiente de determinação de 0,100, indicando que 10% da variação total da PGO foram por ele explicadas, ao passo que para a profundidade de 0,10 a 0,20 m de solo analisada, a PGO pôde ser explicada pela T2, MO2, pH2 e Ca2 ($R^2 = 0,184$), sendo que a T2 explicou a maior parte na variação da PGO (6,3%), seguida do pH2 (5,4%), do Ca2 (3,5%), e, por último, da MO2, explicando 3,2% da variação total da PGO. As demais influências na PGO ficaram por conta de outros fatores que não entraram nos modelos por não serem significativos a 10% de probabilidade.

A explicação proposta com base na regressão linear múltipla demonstrou a implicação de cada atributo pesquisado na produtividade de grãos de arroz, levando em consideração os valores destes na análise química do solo, bem como dos componentes de produção avaliados, o que permitiu classificar qual foi a real contribuição de cada atributo no modelo ajustado.

Pelos resultados obtidos para os componentes de produção, foi verificado que o maior peso equivalente da PGO no modelo ajustado é devido ao NEV (77,67%), seguido pelo NEC e NET (Quadro 14). Por outro lado, com relação aos atributos químicos do solo (0 – 0,10 m), somente o K1 teve sua participação significativa no modelo ajustado, portanto, o peso integral da soma de quadrado do modelo foi em sua função.

Quadro 14. Peso na soma de quadrados e peso em porcentagem dos atributos em cada modelo ajustado pela regressão linear múltipla obtida pelo método *Stepwise*

Variáveis independentes	Atributo ^(a)	Peso na Soma de Quadrado	Peso em Porcentagem
Planta	NEV	46.945.214	77,67
	NEC	54.351.815	12,26
	NET	60.440.391	10,07
Solo (0 – 0,10 m)	K1	21.110.668	100,00
Solo (0,10 – 0,20 m)	T2	13.257.056	34,35
	MO2	19.959.484	17,36
	pH2	31.290.525	29,36
	Ca2	38.599.255	18,93

^(a) Vide Quadros 7, 8 e 9.

Em contrapartida, para a profundidade de 0,10 a 0,20 m, o atributo de maior peso na soma de quadrados foi o T2 (34,35%). Na sequência está o pH2 (29,36%), o Ca2 (18,93%) e a MO2 (17,36%), demonstrando as diferenças equivalentes assim como quão distintos são esses dois perfis do solo analisados. Segundo Maia et al. (2001), o uso do peso em porcentagem leva a uma precisão maior no diagnóstico, pois todos os atributos envolvidos nos modelos (variáveis independentes) estão na mesma escala, no caso, expressos em valores relativos (porcentagem), fato corroborado pelos coeficientes de determinação apresentados no Quadro 13.

4.3. Análise geoestatística dos atributos

4.3.1. Análise semivariográfica simples

4.3.1.1. Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

Apesar de a normalidade dos dados ser uma das pressuposições da estatística clássica, ela não chega a ser uma exigência da geoestatística. Nessa, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Assim, nos Quadros 15, 16 e 17 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os componentes de produção, para a produtividade do arroz, bem como para os atributos químicos do solo no qual o experimento foi instalado. Da mesma forma, nas Figuras de 10 a 15, estão relacionados seus respectivos semivariogramas.

Desta maneira, pode-se constatar que, com exceção do NPA, NEV, NEC, NET e MMG, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial (Quadros 15, 16 e 17). O efeito pepita puro denotou que o comportamento dessas variáveis regionalizadas foi totalmente aleatório, revelando a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que as amostradas, indicando a necessidade de repensar essa distância bem como o tamanho da população amostral adotada neste trabalho.

Em se tratando do desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente dos seus respectivos coeficientes de determinação espacial (r^2) foi a que segue: 1) V%1 (0,996), 2) MO2 (0,993), 3) Ca1 (0,989), 4) pH1 (0,969), 5) Mg2 (0,968), 6) S2 (0,968), 7) S1 (0,968), 8) Ca2 (0,963), 9) #K2 (0,957), 10) #T1 (0,948), 11) V%2 (0,946), 12) pH2 (0,942), 13) H+Al1 (0,942), 14) m%1 (0,941), 15) Al1 (0,940), 16) MO1 (0,883), 17) m%2 (0,878), 18) Mg1 (0,850), 19) #T2 (0,837), 20) P1 (0,834), 21) Al2 (0,788), 22) P2 (0,782), 23) #PGO (0,771), 24) #K1 (0,732) e 25) H+Al2 (0,684), conforme os

Quadro 15: Parâmetros dos semivariogramas simples para alguns componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
#PGO	esf (76)	7,65.10 ⁵	1,61.10 ⁶	47,0	0,771	1,03.10 ¹¹	52,3	ME	2,61	0,926	0,423
NPA	epp	2,60.10 ³	2,60.10 ³	-	-	-	-	-	-	-	-
NEV	epp	5,68.10 ²	5,68.10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
NEC	epp	8,56.10	8,56.10	-	-	-	-	-	-	-	-
NET	epp	6,22.10 ²	6,22.10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
MMG	epp	2,03	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-

^(a) Vide Quadro 7; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo = número de pares no primeiro lag; ^(b) esf = esférico, epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo ME = média.

Quadro 16: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade do arroz de terras altas com atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples – solo</i>											
P1	exp (127)	5,64.10 ¹	1,26.10 ²	46,8	0,834	1,85.10 ²	55,2	ME	-2,00.10 ⁻¹	0,999	0,349
MO1	esf (138)	4,22	1,06.10	50,1	0,883	2,17	60,3	AL	3,68	0,857	0,425
pH1	esf (278)	3,06.10 ⁻²	1,34.10 ⁻¹	62,0	0,969	1,28.10 ⁻⁴	77,2	AL	4,50.10 ⁻¹	0,906	0,597
#K1	exp (65)	1,52.10 ⁻¹	1,28	41,4	0,732	9,08.10 ⁻²	88,1	MA	-3,00.10 ⁻²	0,545	0,212
Ca1	exp (287)	1,17.10	6,30.10	75,3	0,989	7,97	81,4	MA	2,87	0,860	0,542
Mg1	exp (458)	8,30	3,51.10	113,1	0,850	43,3	76,4	AL	7,70.10 ⁻¹	0,946	0,639
H+Al1	esf (98)	2,65.10	1,00.10 ²	55,5	0,942	1,73.10 ²	73,5	AL	1,28.10	0,747	0,448
Al1	esf (193)	4,57	2,19.10	47,2	0,940	5,51	79,2	AL	1,22	0,789	0,503
S1	exp (298)	7,45.10	2,29.10 ²	119,1	0,968	362	67,5	AL	5,80.10 ⁻¹	0,982	0,607
#T1	exp (110)	2,10.10	4,19.10	181,2	0,948	1,65.10	50,0	ME	-2,00.10 ⁻²	0,883	0,404
V%1	esf (317)	6,03.10	1,68.10 ²	62,0	0,996	1,54.10	64,1	AL	3,78	0,909	0,539
m%1	esf (144)	5,20.10	1,83.10 ²	43,0	0,941	3,26.10 ²	71,5	AL	3,54	0,762	0,447
<i>γ(h) cruzado – planta x solo</i>											
#PGO=f(P1)	gau (171)	-2,74.10 ²	-2,50.10 ³	37,6	0,679	1,02.10 ⁶	89,0	MA	8,36	0,525	0,370
#PGO=f(#K1)	gau (215)	-1,00.10 ⁻¹	-3,00.10 ²	52,3	0,852	9,03.10 ³	99,9	MA	4,40.10	0,561	0,402

^(a) Vide Quadros 7 e 8; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo = número de pares no primeiro lag;

^(b) exp = exponencial, esf = esférico e gau = gaussiano; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo ME = média, AL = alta e MA = muito alta.

Quadro 17: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade do arroz de terras altas com atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

Atributo ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples – solo</i>											
P2	esf (89)	1,49.10 ²	2,98.10 ²	93,4	0,782	4,90.10 ³	50,0	ME	8,90.10 ⁻¹	0,962	0,474
MO2	esf (194)	3,75	8,87	73,2	0,993	1,09.10 ⁻¹	57,7	ME	7,00.10 ⁻²	0,998	0,518
pH2	esf (287)	6,90.10 ⁻³	8,50.10 ⁻²	60,0	0,942	1,32.10 ⁻⁴	91,9	MA	8,60.10 ⁻¹	0,813	0,609
#K2	exp (113)	1,13.10 ⁻¹	9,79.10 ⁻¹	40,2	0,957	4,75.10 ⁻³	88,5	MA	-4,00.10 ⁻²	0,461	0,187
Ca2	esf (293)	2,55	2,98.10	57,7	0,963	9,71	91,4	MA	1,08	0,922	0,719
Mg2	esf (330)	1,40	1,69.10	71,4	0,968	3,44	91,7	MA	6,90.10 ⁻¹	0,926	0,731
H+Al2	esf (161)	4,19.10	1,27.10 ²	58,6	0,684	1,43.10 ³	67,1	AL	5,16	0,915	0,574
Al2	esf (255)	4,20	4,75.10 ¹	53,4	0,788	1,43.10 ²	91,2	MA	2,09	0,825	0,636
S2	esf (338)	8,00	9,04.10 ¹	64,9	0,968	8,16.10	91,1	MA	1,87	0,925	0,736
#T2	esf (103)	3,43.10	6,86.10	74,6	0,837	1,12.10 ²	50,0	ME	-1,86.10 ⁻²	0,878	0,427
V%2	esf (316)	1,06.10	1,34.10 ²	56,8	0,946	2,83.10 ²	92,1	MA	2,47	0,915	0,722
m%2	esf (256)	3,25.10	3,37.10 ²	54,6	0,878	3,90.10 ³	90,3	MA	4,13	0,877	0,671
<i>γ(h) cruzado – planta x solo</i>											
#PGO=f(P2)	esf (275)	-1,00.10	-6,59.10 ⁻³	84,0	0,613	1,44.10 ⁷	99,8	MA	-5,93	0,738	0,523
#PGO=f(MO2)	exp (210)	4,00	7,23.10 ²	138,3	0,950	1,67.10 ⁴	99,4	MA	2,69	0,603	0,421
#PGO=f(#K2)	gau (76)	-2,70	-1,92.10 ²	68,2	0,537	3,52.10 ⁴	98,6	MA	1,82.10	0,596	0,410
#PGO=f(H+Al2)	gau (158)	-1,00	-1,84.10 ⁴	99,8	0,641	2,37.10 ⁶	99,9	MA	8,38	0,573	0,404
#PGO=f(#T2)	esf (111)	-1,01.10 ²	-1,46.10 ³	96,0	0,613	1,05.10 ⁶	93,1	MA	6,72	0,633	0,434
#PGO=f(m%2)	gau (245)	-1,00	-2,86.10 ³	87,0	0,423	1,44.10 ⁷	99,9	MA	2,56.10	0,611	0,428

^(a) Vide Quadros 7 e 9; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo = número de pares no primeiro lag;

^(b) exp = exponencial, esf = esférico e gau = gaussiano; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo ME = média, AL = alta e MA = muito alta.

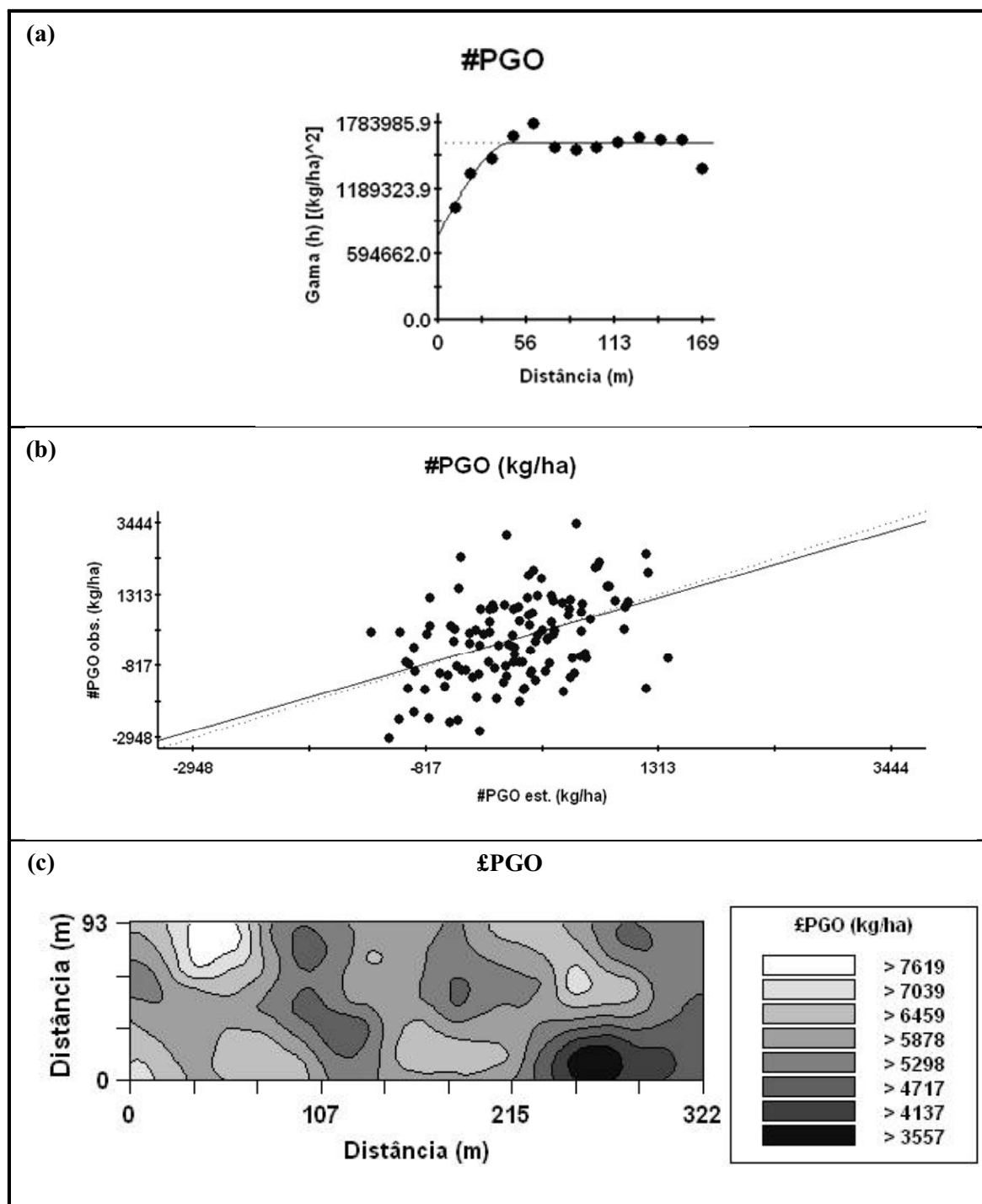


Figura 10: Semivariograma simples, validação cruzada e mapa de krigagem da produtividade do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

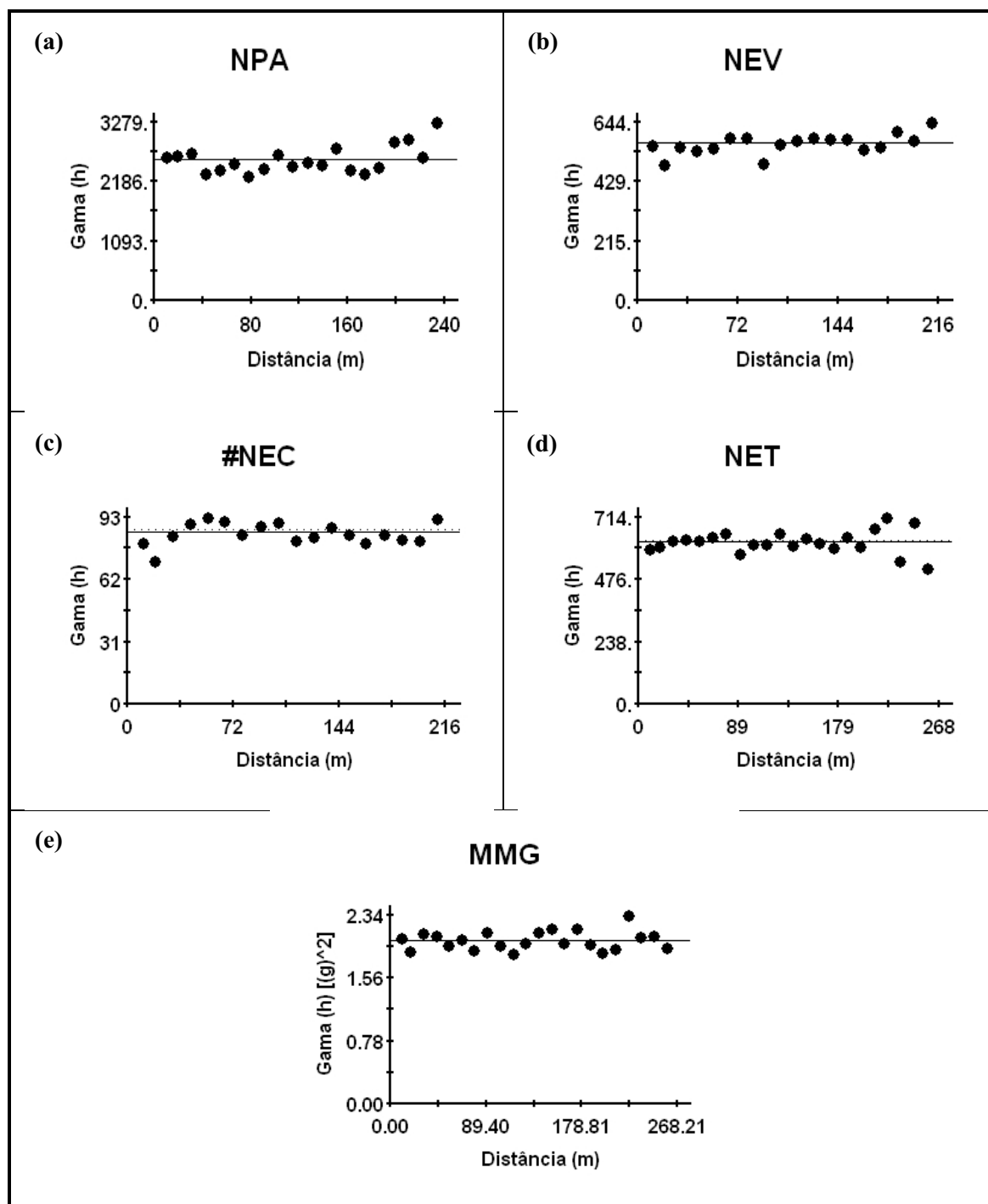


Figura 11: Semivariogramas simples dos componentes da produção do arroz de terras altas em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

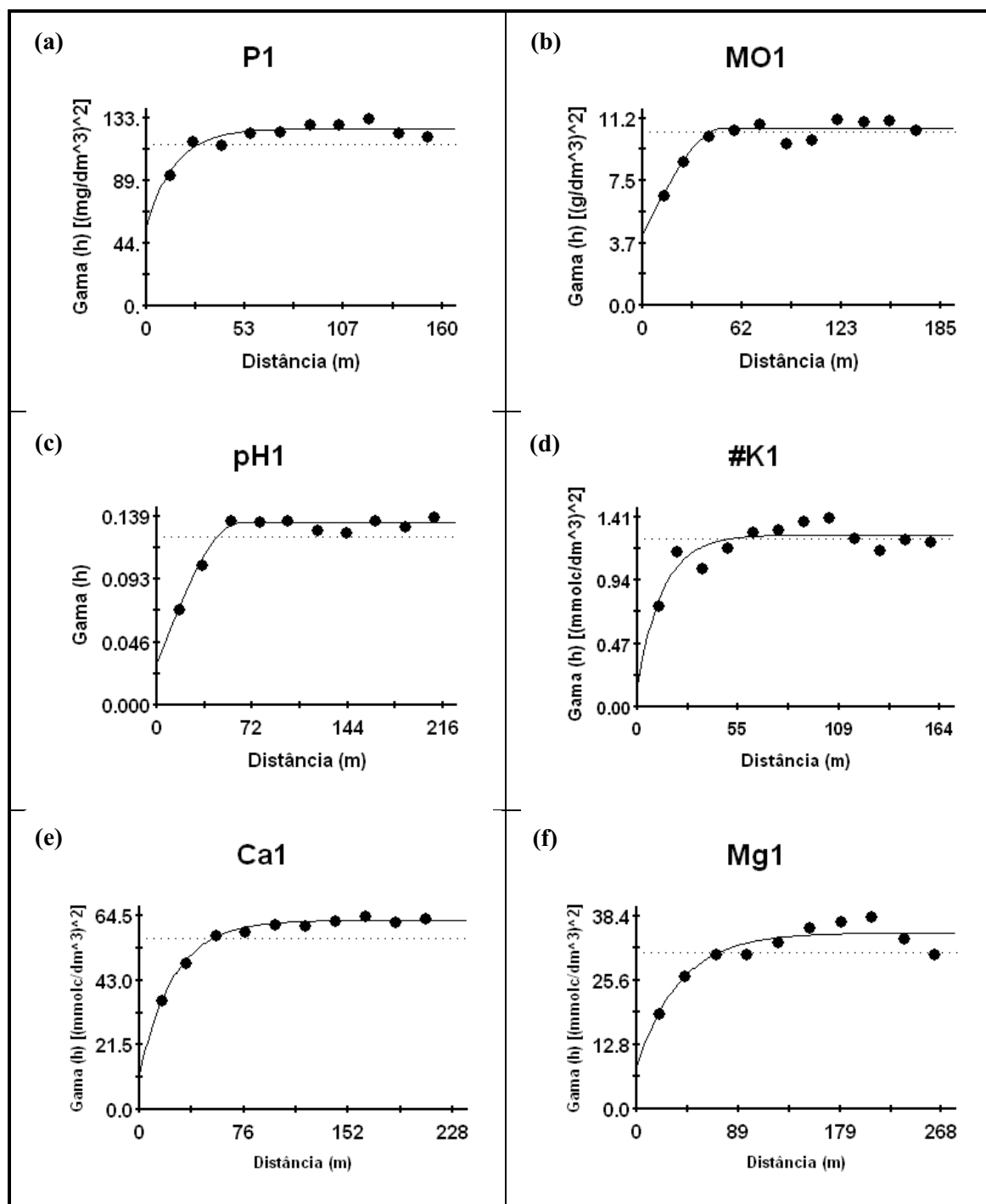


Figura 12: Semivariogramas simples dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, #K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

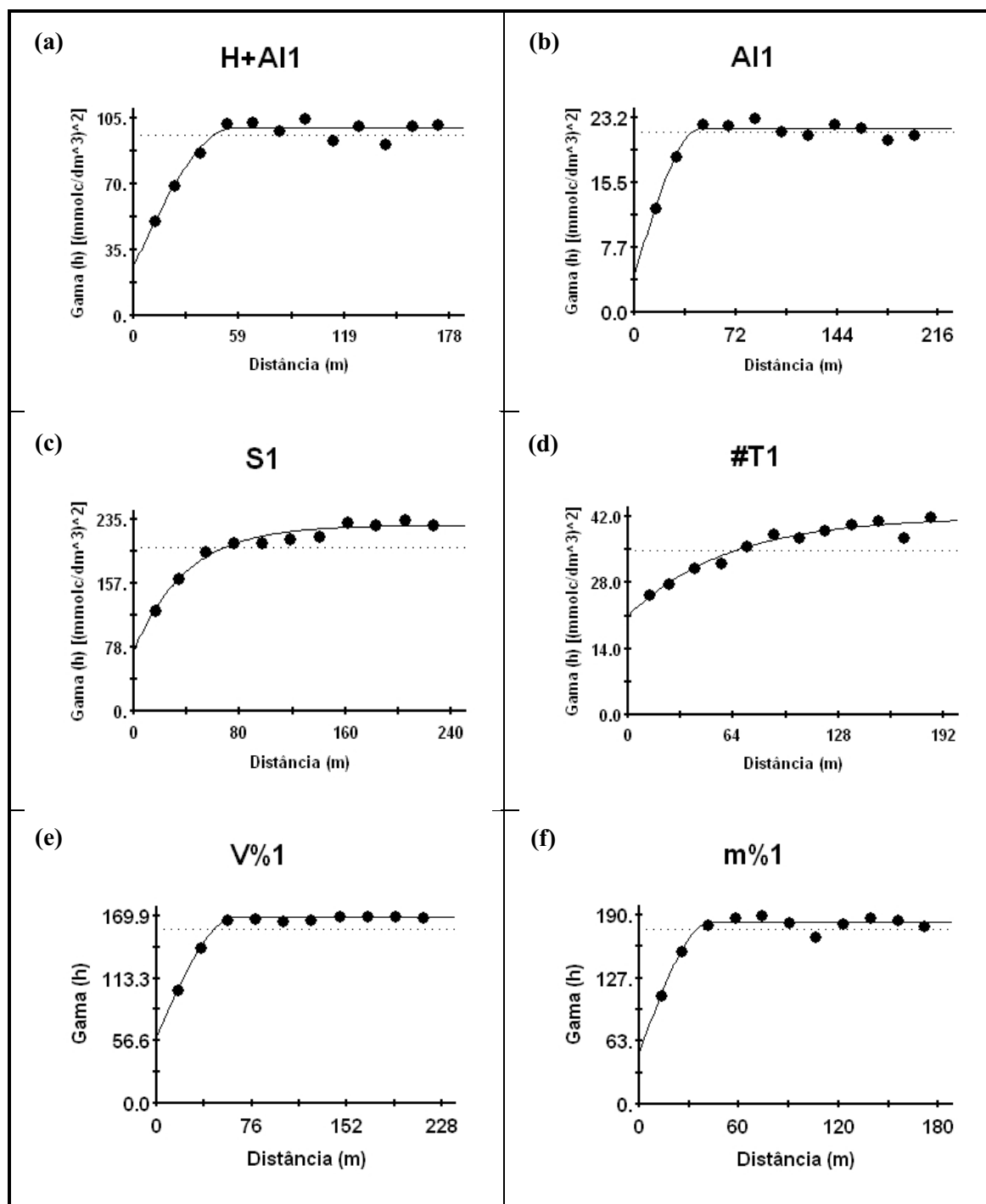


Figura 13: Semivariogramas simples dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, #T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

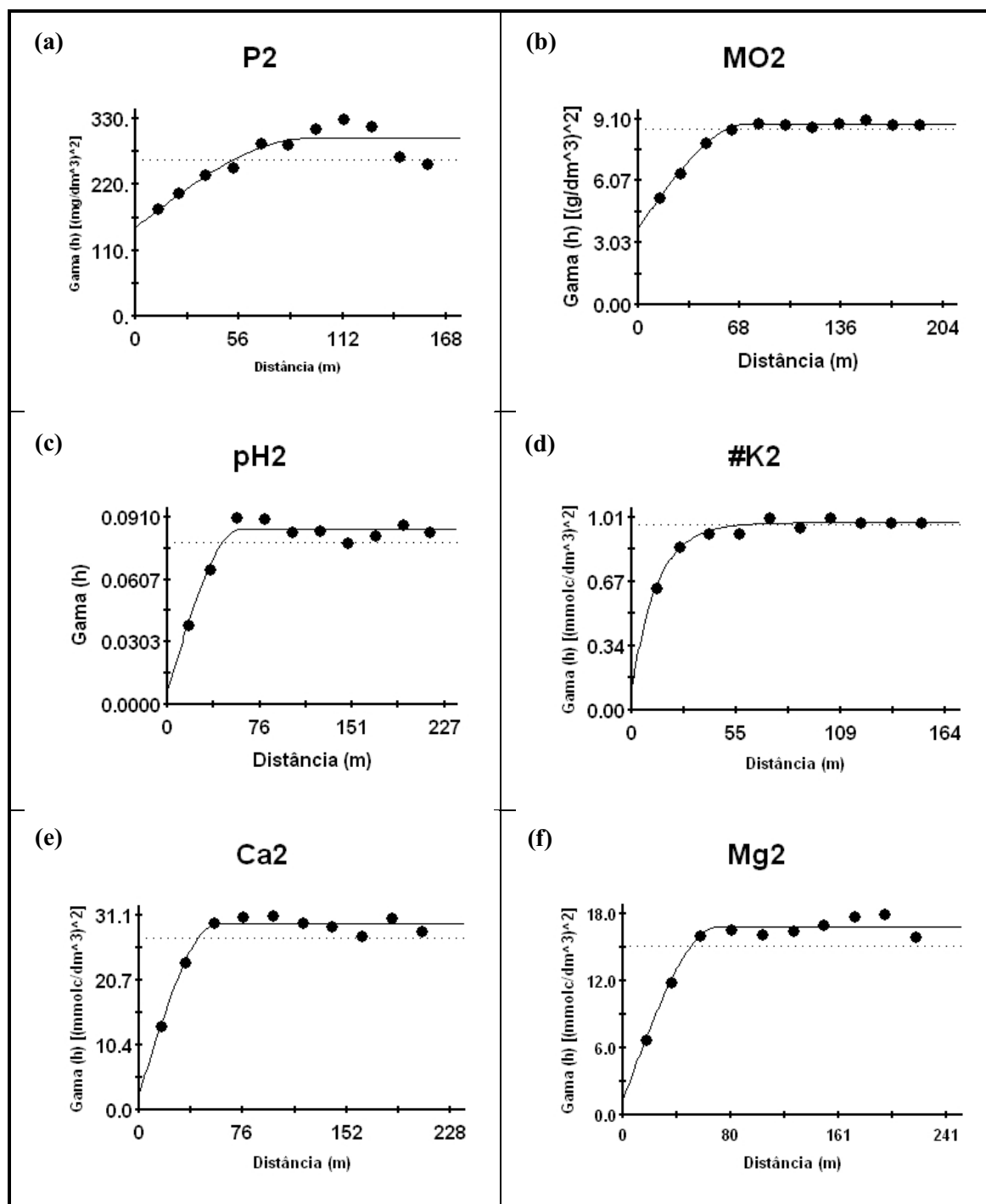


Figura 14: Semivariogramas simples dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, #K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

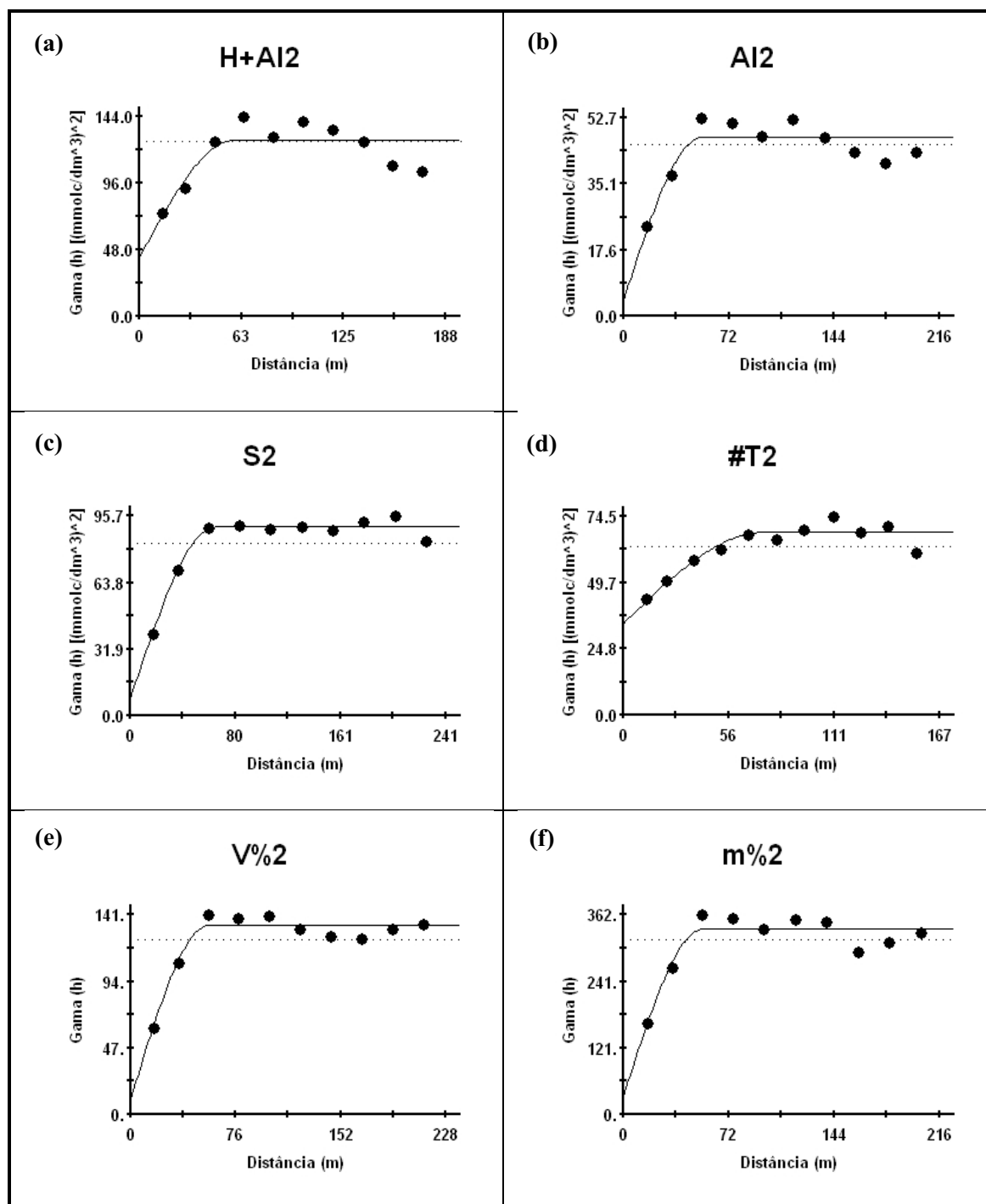


Figura 15: Semivariogramas simples dos atributos químicos (H+Al₂, Al₂, S₂, #T₂, V%₂ e m%₂) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

Quadros 15, 16 e 17. Assim, destacam-se os três primeiros atributos (V%1, MO2 e Ca1) em função de possuírem os mais elevados coeficientes de determinação espacial e a #PGO, dada a sua importância agrônômica.

Como pode ser verificado no Quadro 16, para a V%1 ajustou-se o modelo esférico com alcance da dependência espacial de 62,0 m e avaliador da dependência espacial (ADE) classificado como de alta dependência (64,1%), corroborando Guedes Filho et al. (2010), em estudo avaliando a variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas e atributos de um LATOSSOLO sob semeadura direta, que também ajustaram o modelo esférico com um alcance de 65,0 m e ADE de 64,0%. Entretanto, discorda de Molin et al. (2007), que estudaram a variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e ajustaram modelo exponencial, e de Valladares et al. (2006), que utilizando a geoestatística na avaliação da fertilidade do solo e eficiência técnica para a cultura do arroz, descreveram baixa dependência (ADE = 37,0%).

A MO2 apresentou um ajuste semivariográfico do tipo esférico (Quadro 17), concordando com Vieira e Gonzalez (2003), Parfitt et al. (2009), Guedes Filho et al. (2010) e Silva et al. (2010). Por outro lado, o valor do alcance obtido (73,2 m) discordou dos estudos dos referidos autores, que relataram valores de 44,8 m, 44,7 m, 116,5 m e 15,4 m, respectivamente, entretanto, ressalta-se que tal parâmetro é muito dependente do tamanho da malha experimental. Com relação ao ADE (57,7%), a dependência espacial foi média, concordando com Silva et al. (2003), com ADE de 57,0%. Por outro lado, discordou de Vieira e Gonzalez (2003) e Parfitt et al. (2009), que observaram alta dependência espacial, e Guedes Filho et al. (2010), que relataram baixa dependência espacial, cujo os valores dos ADEs para os ajustes dos semivariogramas foram, respectivamente, de 75,6%, 67,3% e 30,0%.

Em relação ao Ca1, foi obtido o modelo exponencial (Quadro 16), concordando com Yanai et al. (2001) que pesquisaram a variabilidade espacial da produtividade do arroz e de propriedades químicas do solo, e com Hurtado et al. (2009), que pesquisaram a variabilidade espacial de atributos químicos em um LATOSSOLO VERMELHO. Contudo discorda de Parfitt et al. (2009), que apresentaram modelo semivariográfico do tipo gaussiano ao estudarem a variabilidade espacial de atributos químicos em um PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico gleissólico. O alcance de 75,3 m foi superior ao alcance de 12,4 m relatado por Silva et al. (2003), mas inferior ao observado por Parfitt et al. (2009), que foi de 252,7 m. O valor da dependência espacial foi classificado como

muito alto (ADE = 81,4%), sendo superior ao ADE (55,4%) observado por Hurtado et al. (2009), com média dependência.

E para a #PGO apresentou um ajuste semivariográfico do tipo esférico (Quadro 15), concordando com Yanai et al. (2001) e Vieira e Gonzalez (2003). Entretanto, os valores do alcance (47,0 m) e do ADE tido como médio (52,3%), são inferiores aos valores de Yanai et al. (2001), que descreveram valores de 52,9 m 65,0%, e superiores aos valores de Vieira e Gonzalez (2003), na cultura do arroz de terras altas, que relataram valores de 37,8 m e 29,5%, respectivamente, para o alcance e para o ADE.

Nos Quadros 15, 16 e 17, podem ser observados ainda os valores dos alcances dos atributos pesquisados, cuja relação decrescente foi a seguinte: 1) #T1 (181,2 m), 2) S1 (119,1 m), 3) Mg1 (113,1 m), 4) P2 (93,4 m), 5) Ca1 (75,3 m), 6) #T2 (74,6 m), 7) MO2 (73,2 m), 8) Mg2 (71,4 m), 9) S2 (64,9 m), 10) pH1 (62,0 m), 11) V%1 (62,0 m), 12) pH2 (60,0 m), 13) H+Al2 (58,6 m), 14) Ca2 (57,7 m), 15) V%2 (56,8 m), 16) H+Al1 (55,5 m), 17) m%2 (54,6 m), 18) Al2 (53,4 m), 19) MO1 (50,1 m), 20) Al1 (47,2 m), 21) #PGO (47,0 m), 22) P1 (46,8 m), 23) m%1 (43,0 m), 24) #K1 (41,4 m) e 25) #K2 (40,2 m). O valor do alcance pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação. Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004). Portanto, tendo em vista o auxílio as pesquisas posteriores de caráter semelhante a este estudo, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, em âmbito geral, não deverão ser menores do que 40,2 m.

4.3.1.2. Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados para os atributos

Nos Quadros 15, 16 e 17 estão apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes à krigagem para a produtividade do arroz assim como para alguns atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Selvíria (MS). Neste contexto, nas Figuras 10, 16, 17, 18 e 19, são apresentadas as respectivas validações cruzadas, que conforme ordem decrescente da grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: 1) S2 (0,736), 2) Mg2 (0,731), 3) V%2 (0,722), 4) Ca2 (0,719), 5) m%2 (0,671), 6) Mg1 (0,639), 7) Al2 (0,636), 8) pH2 (0,609), 9) S1 (0,607), 10) pH1 (0,597), 11) H+Al2 (0,574), 12) Ca1 (0,542), 13) V%1 (0,539), 14) MO2 (0,518), 15) Al1 (0,503), 16) P2 (0,474), 17) H+Al1 (0,448), 18) m%1 (0,447), 19) #T2

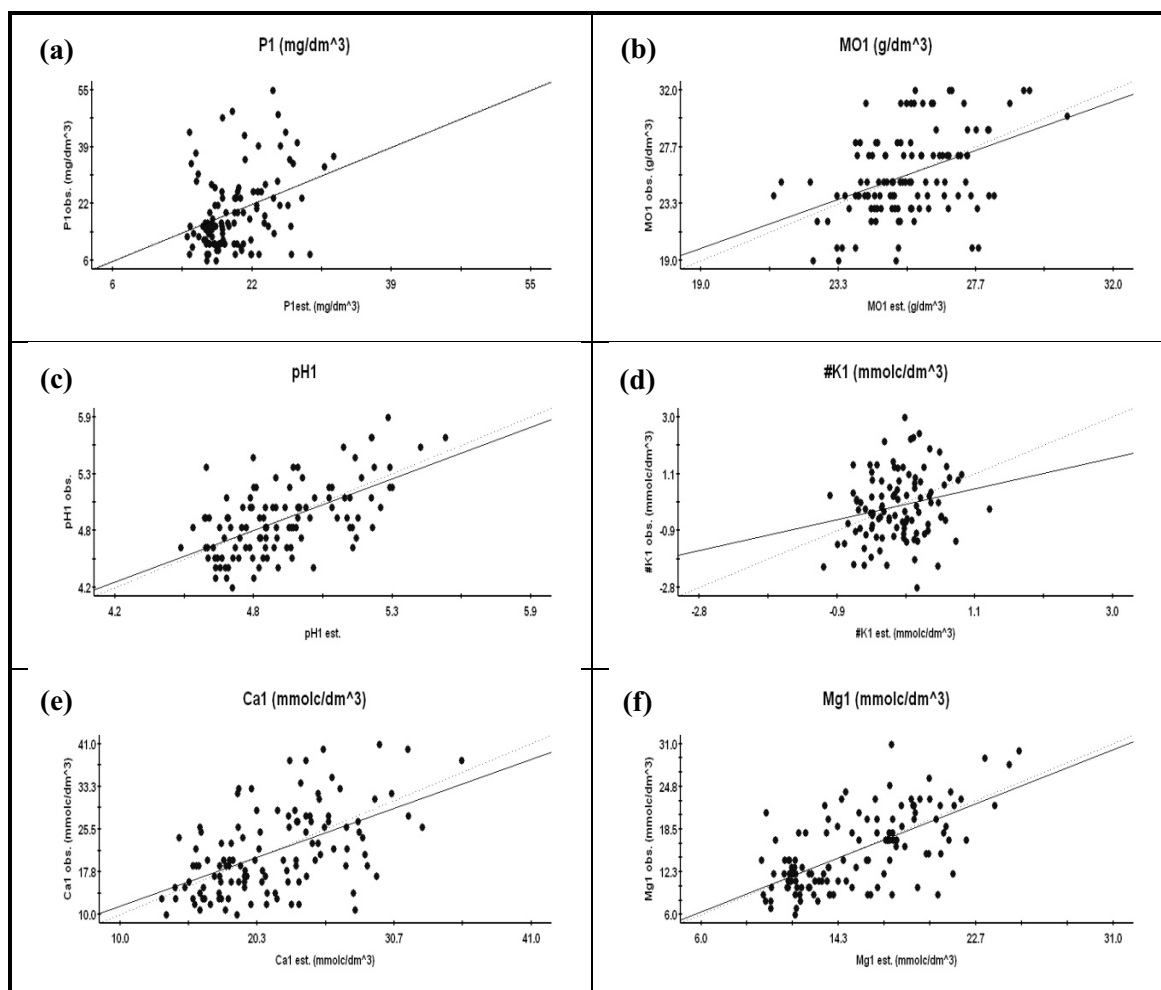


Figura 16: Validação cruzada dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, #K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

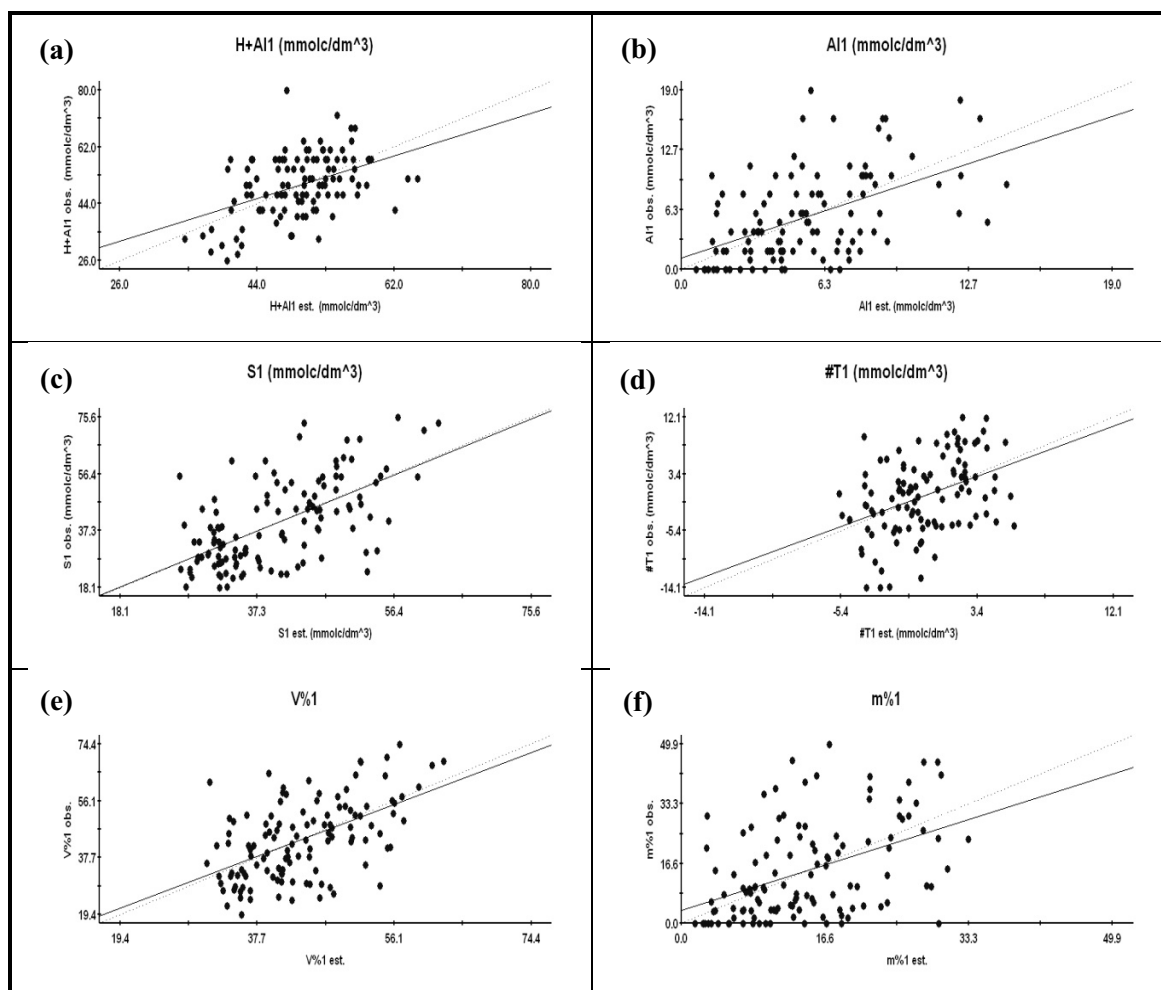


Figura 17: Validação cruzada dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, #T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

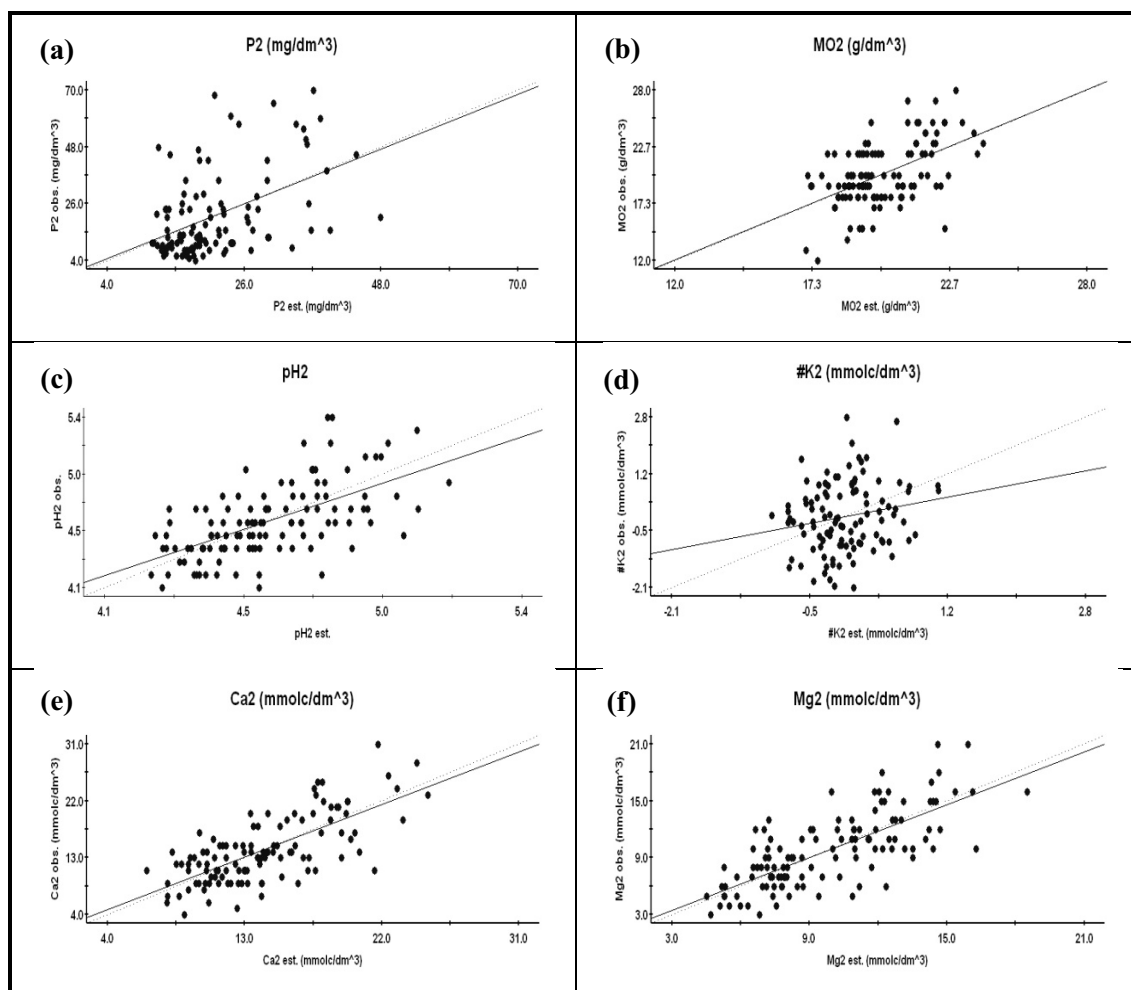


Figura 18: Validação cruzada dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, #K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

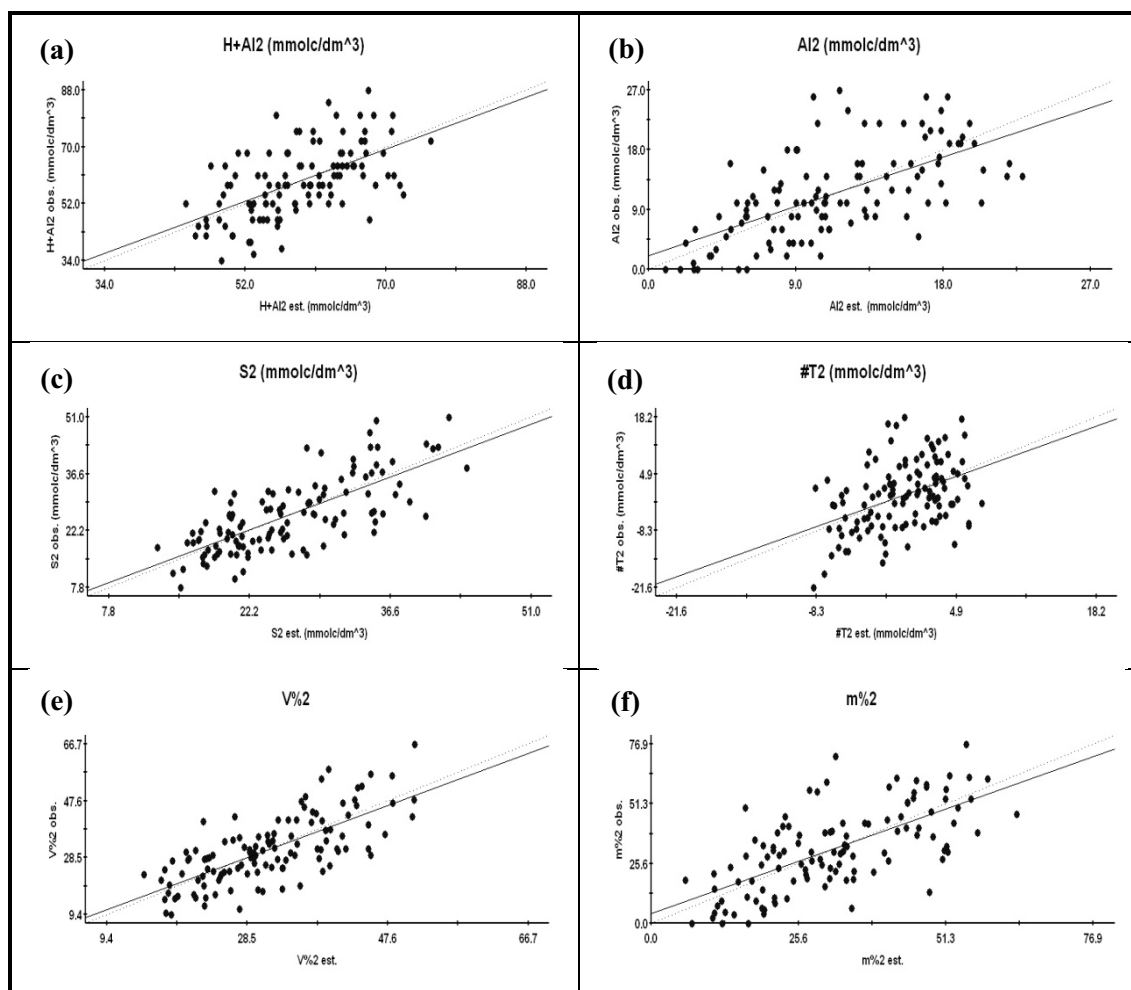


Figura 19: Validação cruzada dos atributos químicos (H+Al₂, Al₂, S₂, #T₂, V%₂ e m%₂) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

(0,427), 20) MO1 (0,425), 21) #PGO (0,423), 22) #T1 (0,404), 23) P1 (0,349), 24) #K1 (0,212) e 25) #K2 (0,187).

Assim, pôde ser constatado que as cinco melhores validações cruzadas obtidas foram para os atributos S2, Mg2, V%2, Ca2 e m%2. Os coeficientes angulares (b) das retas das validações cruzadas variaram entre 0,461 (#K2) e 0,999 (P1), conforme pode ser visualizado nos Quadros 16 e 17. Por outro lado, a S2 resultou em maior coeficiente de determinação espacial (r^2) assim como o maior coeficiente de correlação (r) para a validação cruzada. Este atributo, no âmbito da análise geoestatística, apresentou-se como um potencial indicador da qualidade química do solo na camada de 0,10 - 0,20 m.

4.3.1.3. Mapas de krigagem dos atributos

Nas Figuras 10, 20, 21, 22 e 23 estão evidenciados os mapas de krigagem simples da produtividade de grãos de arroz e dos atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Selvíria (MS). Na Figura 10c, que apresenta o mapa de krigagem da £PGO, observa-se que nas regiões sul, noroeste-sudoeste e nordeste, ocorreram os mais elevados valores da £PGO (5878-7619 kg ha⁻¹). Em contrapartida, nas demais regiões ocorreram os mais baixos valores da £PGO (3557-5298 kg ha⁻¹), indicando manchas de produtividades extremamente variadas, fato também evidenciado por Molin et al. (2007), fato associado a variabilidade espacial dos atributos químicos no solo.

Contudo, para as regiões centro-oeste, noroeste, nordeste e sudeste, foram observadas semelhanças inversas entre o mapa da £PGO e os mapas da H+Al1, Al1 e m%1 (Figuras 10c e 21), concordando com Durigon (2007) que constatou semelhança inversa entre o mapa de krigagem da PGO do arroz em cultivo irrigado por inundação e os mapas do Al e m%. Assim, para as regiões centro-oeste e sudeste, onde os valores mais baixos variaram entre 32,0 e 45,7 mmol_c dm⁻³; 0,2 e 6,0 mmol_c dm⁻³ e 0,4 e 14,6% para H+Al1, Al1 e m%1, respectivamente, ocorreram os mais elevados valores da £PGO (5878-7619 kg ha⁻¹), ao passo que nas regiões noroeste e nordeste, que ocorreram os mais elevados valores da H+Al1, Al1 e m%1 (50,3 a 64,0 mmol_c dm⁻³; 8,0 a 13,8 mmol_c dm⁻³ e 19,3 a 33,5%, respectivamente), foram verificados os mais baixos valores da £PGO (3557-5298 kg ha⁻¹), ficando evidente a relação inversa entre a £PGO e esses atributos do solo.

As mesmas semelhanças inversas também foram constatadas entre o mapa da

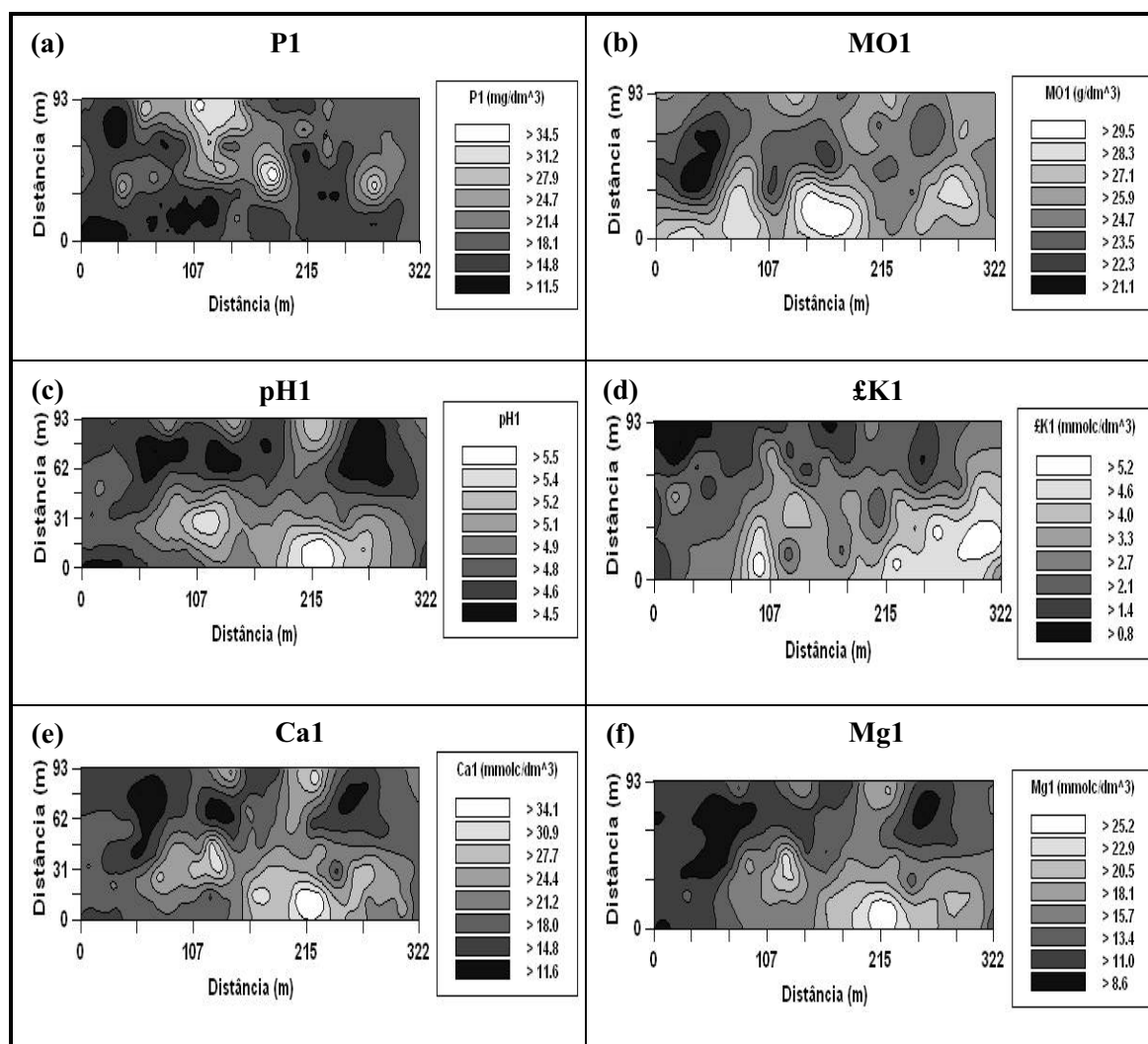


Figura 20: Mapas de krigagem dos atributos químicos (P1, MO1, pH1, £K1, Ca1 e Mg1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

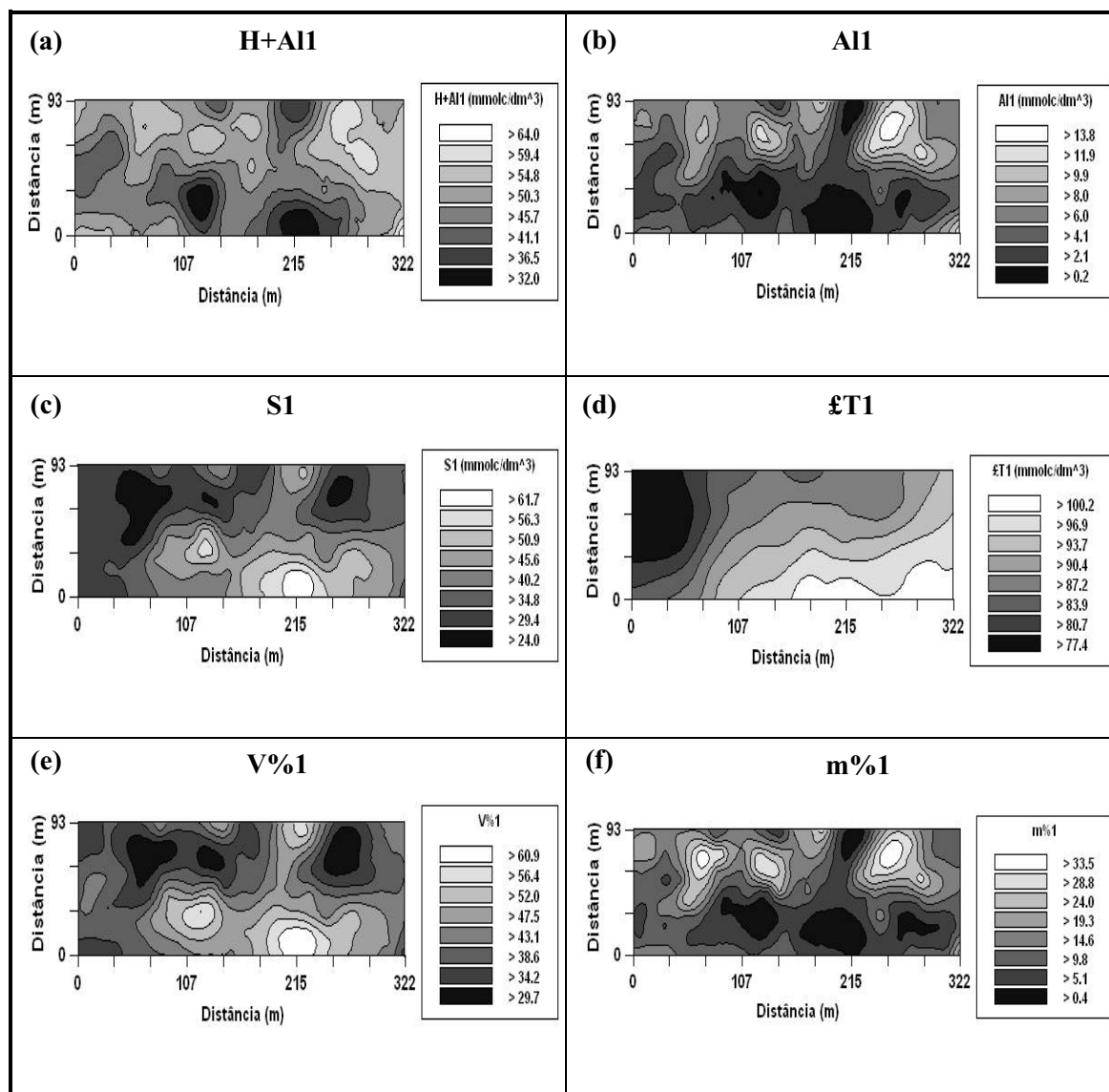


Figura 21: Mapas de krigagem dos atributos químicos (H+Al1, Al1, S1, £T1, V%1 e m%1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0 a 0,10 m sob sistema plantio direto

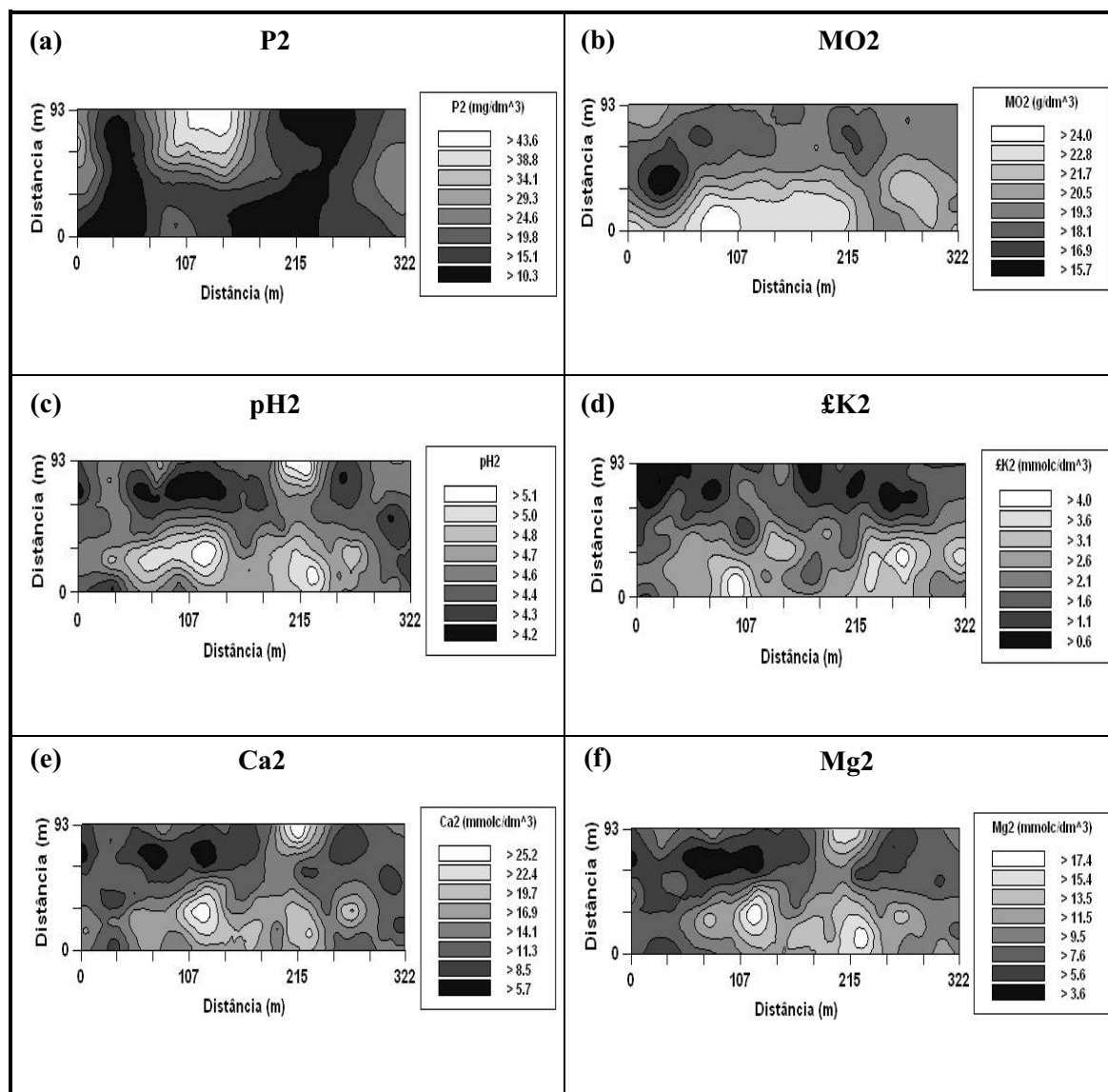


Figura 22: Mapas de krigagem dos atributos químicos (P2, MO2, pH2, £K2, Ca2 e Mg2) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

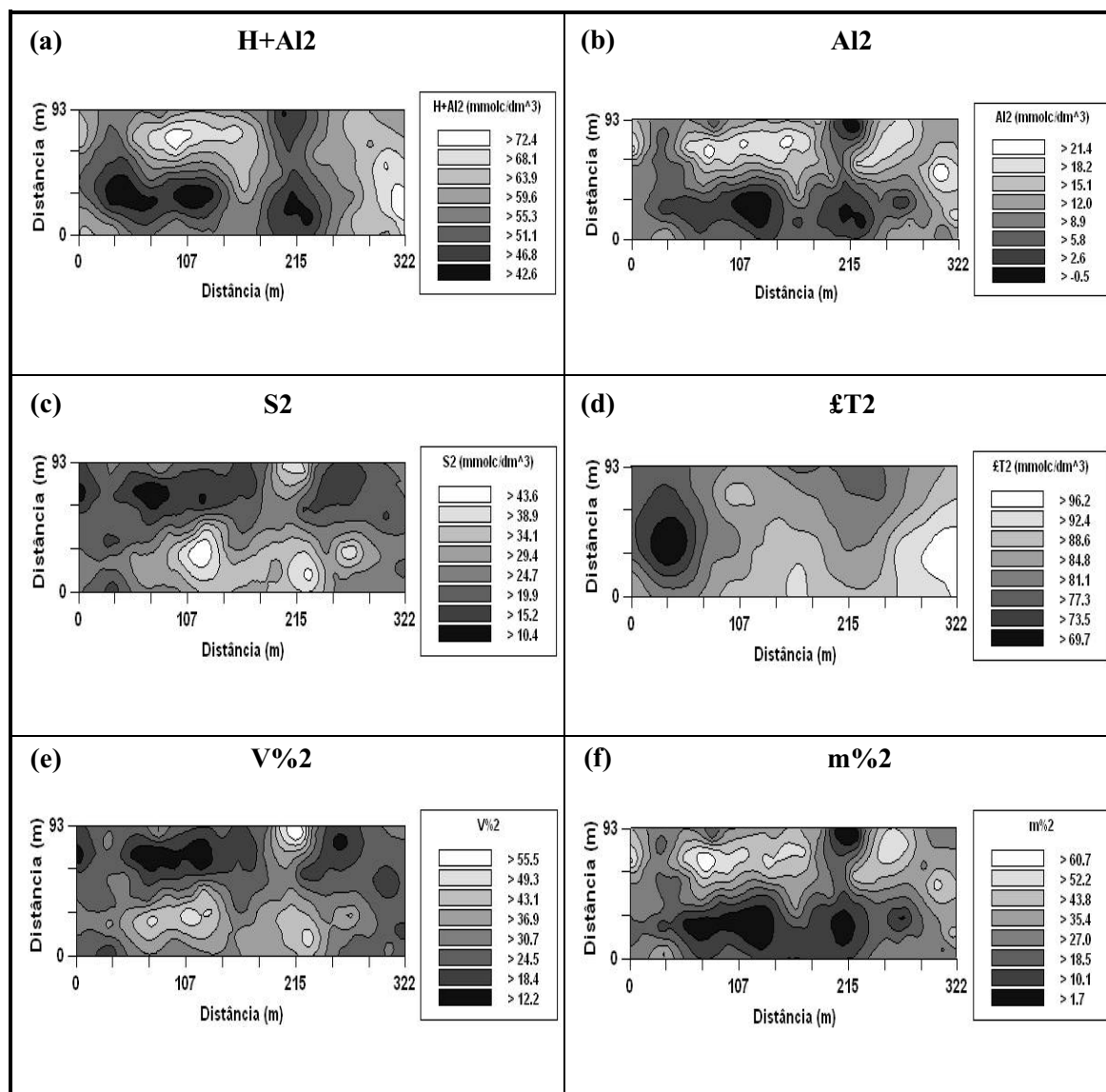


Figura 23: Mapas de krigagem dos atributos químicos (H+Al₂, Al₂, S₂, £T₂, V%₂ e m%₂) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico na profundidade de 0,10 a 0,20 m sob sistema plantio direto

£PGO e os mapas da H+Al₂, Al₂ e m%₂ (Figuras 10c e 23). Entretanto, os mais baixos valores para Al₂ (0,5 a 8,9 mmolc dm⁻³) e m%₂ (1,7 a 27,0%), nas regiões centro-oeste,

noroeste, nordeste e sudeste, diferiram dos valores observados na profundidade de 0 a 0,10 m, assim como para os valores mais elevados (Al₂ entre 12,0 e 21,4 mmol_c dm⁻³; m% entre 35,4 e 60,7%). Já para a H+Al₂, a semelhança inversa somente foi observada nas regiões centro-oeste e centro-sudeste, cujos valores mínimos ficaram entre 42,6 e 55,3 mmol_c dm⁻³ e os valores máximos entre 59,6 e 72,4 mmol_c dm⁻³. Contudo, e independentemente das regiões, foi possível verificar que os valores dos atributos químicos H+Al, Al e m% na profundidade de 0,10 a 0,20 m foram mais elevados que na profundidade de 0 a 0,10 m. Nesta, o efeito da correção da acidez do solo é mais intenso, deslocando para a subsuperfície do solo o Al, local onde fica fortemente adsorvido no complexo coloidal. Neste contexto, Silva et al. (2010) observaram que em regiões onde os teores de Al estavam elevados, houve uma redução na disponibilidade dos nutrientes às plantas, consequentemente, a produtividade da cultura foi comprometida.

Exclusivamente para os atributos do solo, semelhança direta ocorreu entre os mapas de krigagens da MO1, pH1, £K1, Ca1, Mg1, S1, £T1 e V%1 (Figuras 20 e 21). Durigon (2007), no município de São Francisco de Assis-RS, também verificou semelhança direta entre os mapas de krigagem do Ca e Mg, assim como Machado et al. (2007) em relação aos mapas da MO, Ca, Mg, T e V%, em sistema de cultivo convencional do solo, em Uberlândia-MG. Para estes atributos, os sítios onde ocorreram os mais elevados valores foram praticamente os mesmos, e de forma análoga, os mais baixos valores também coincidiram espacialmente em toda a malha experimental. No entanto, o mapa de krigagem da £T1 (Figura 21d) apresentou concentrações regionais de valores, porém crescentes nos sentidos norte-sul/oeste-leste.

Outro grupo de mapas de krigagens com semelhanças diretas foi verificado para H+Al₁, Al₁ e m%₁ (Figura 21), cujas regiões de valores máximos e mínimos nos mapas são coincidentes, estando de acordo com as constatações de Durigon (2007), que em seu trabalho indicou semelhanças diretas entre os mapas de krigagens do Al e m%, e Souza et al. (2008b), para a H+Al, Al e m%, em Alegre-ES. Contudo, semelhanças inversas foram constatadas entre os mapas de krigagens dos atributos do primeiro grupo (MO1, pH1, £K1, Ca1, Mg1, S1, £T1 e V%1) e os atributos do segundo grupo (H+Al₁, Al₁ e m%₁), indicando que nas regiões mapeadas onde ocorreram os maiores valores de MO1, pH1, £K1, Ca1, Mg1, S1, £T1 e V%1, foram justamente as regiões onde ocorreram os menores valores de H+Al₁, Al₁ e m%₁, sendo o inverso verdadeiro. Assim, foi observado que quando os teores de Al foram elevados, indicaram redução na

fertilidade do solo, estando de acordo com Silva et al. (2010). Neste sentido, Souza et al. (2008b) também verificaram que menores valores de Al e m% estão relacionados com regiões de maiores valores do pH. Isso ocorre porque em pH maior que 5,6 praticamente todo Al presente no solo é neutralizado (DADALTO; FULLIN, 2001), reduzindo, assim, o valor da m%.

As observações com relação às semelhanças (diretas e inversas) entre os mapas de krigagem dos atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,10 m, também são verdadeiras para a profundidade de 0,10 - 0,20 m, conforme pode ser verificado nas Figuras 22 e 23.

4.3.2. Análise semivariográfica cruzada

4.3.2.1. Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem dos atributos

Entre dois atributos quaisquer, se apresentarem elevado coeficiente de correlação de Pearson e significativo, e ambos derem semivariograma, a cokrigagem com certeza existirá. Entretanto, se apresentarem baixo coeficiente de correlação de Pearson e não significativo, mas ambos apresentarem semivariograma, a cokrigagem pode ou não existir. Neste sentido, estão relacionados nos Quadros 16 e 17 os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre a produtividade do arroz e alguns atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Selvíria (MS). Assim, ficou comprovado que as co-krigagens $\#PGO=f(P1)$, $\#PGO=f(\#K1)$, $\#PGO=f(P2)$, $\#PGO=f(MO2)$, $\#PGO=f(\#K2)$, $\#PGO=f(H+Al2)$, $\#PGO=f(\#T2)$ e $\#PGO=f(m\%2)$ apresentaram dependência espacial.

A relação decrescente dos coeficientes de determinação espacial (r^2) dos semivariogramas cruzados (Quadros 16 e 17) foi a seguinte: 1) [$\#PGO=f(MO2)$] (0,950), 2) [$\#PGO=f(\#K1)$] (0,852), 3) [$\#PGO=f(P1)$] (0,679), 4) [$\#PGO=f(H+Al2)$] (0,641), 5) [$\#PGO=f(P2)$] (0,613), 6) [$\#PGO=f(\#T2)$] (0,613), 7) [$\#PGO=f(\#K2)$] (0,537) e 8) [$\#PGO=f(m\%2)$] (0,423). No entanto, se for considerada a relação decrescente das validações cruzadas analisada a partir da grandeza do coeficiente de correlação (r), o comportamento passa a ser: 1) [$\#PGO=f(P2)$] (0,523), 2) [$\#PGO=f(\#T2)$] (0,434), 3) [$\#PGO=f(m\%2)$] (0,428), 4) [$\#PGO=f(MO2)$] (0,421), 5) [$\#PGO=f(\#K2)$] (0,410), 6) [$\#PGO=f(H+Al2)$] (0,404), 7) [$\#PGO=f(\#K1)$] (0,402) e 8) [$\#PGO=f(P1)$] (0,370). Como puderam ser verificados, os melhores ajustes, atestados pelos coeficientes de correlação (r) da validação cruzada, ocorreram na profundidade de 0,10 - 0,20 m, região onde, normalmente, a reciclagem de nutrientes oriunda da

decomposição vegetal é menos intensa quando comparado à camada superficial, entretanto, isso tal fato é dependente do tempo de SPD e da mobilidade do nutriente. Os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,525 [$\#PGO=f(P1)$] e 0,738 [$\#PGO=f(P2)$].

Nas Figuras 24 a 26, estão contidos os semivariogramas cruzados, as validações cruzadas e os mapas de co-krigagens entre a $\#PGO$ *versus* atributos do solo. Desta forma, das co-krigagens atestadas pelo coeficiente de determinação espacial (r^2), a $\#PGO=f(MO2)$ apresentou um ajuste semivariográfico do tipo exponencial direto (Quadro 17; Figura 24), cujo alcance da dependência espacial foi de 138,3 m e dependência muito alta (ADE = 99,4%). Assim, foi constatado que 95,0% da variabilidade espacial da $\#PGO$ foram explicadas pela variabilidade espacial da MO2. Portanto, do ponto de vista espacial da área pesquisada, nos sítios em que a matéria orgânica do solo apresentar teores entre 20,5-24,0 g dm⁻³, a produtividade esperada de grãos de arroz, cultivar IAC 202, estará compreendida entre 5743-8136 kg ha⁻¹. Por outro lado, naqueles onde a matéria orgânica do solo estiver entre 15,7-19,3 g dm⁻³, a produtividade esperada de grãos de arroz estará compreendida entre 2552-4945 kg ha⁻¹. Deste modo, sob o ponto de vista espacial, pôde-se constatar que a matéria orgânica do solo apresentou-se como o melhor indicador da produtividade de grãos de arroz quando cultivado no sistema plantio direto.

Para a cokrigagem $\#PGO=f(H+A12)$, ajustou-se o semivariograma de modelo gaussiano (Quadro 17; Figura 25), de comportamento inverso, indicando que nas regiões onde houver um aumento nos teores de H+A12, implicará em queda da $\#PGO$, sendo o inverso verdadeiro. O alcance da dependência espacial foi de 99,8 m, com dependência muito alta (ADE = 99,9%). Desta forma, a H+A12 foi o segundo melhor estimador da variabilidade espacial da $\#PGO$, apresentando uma precisão na estimativa de 64,1%. Assim, nas regiões em que a H+A12 apresentar teores entre 42,6-55,3 mmol_c dm⁻³, a $\#PGO$ estará compreendida entre 5746-8198 kg ha⁻¹. Entretanto, naquelas regiões onde a H+A12 estiver entre 59,6-72,4 mmol_c dm⁻³, a $\#PGO$ estará incluída entre 2475-4928 kg ha⁻¹.

E por último, para a cokrigagem $\#PGO=f(m\%2)$, também foi modelado um semivariograma do tipo gaussiano inverso (Quadro 17; Figura 26), com 87,0 m de alcance da dependência espacial, e dependência muito alta (99,0%). Esta cokrigagem

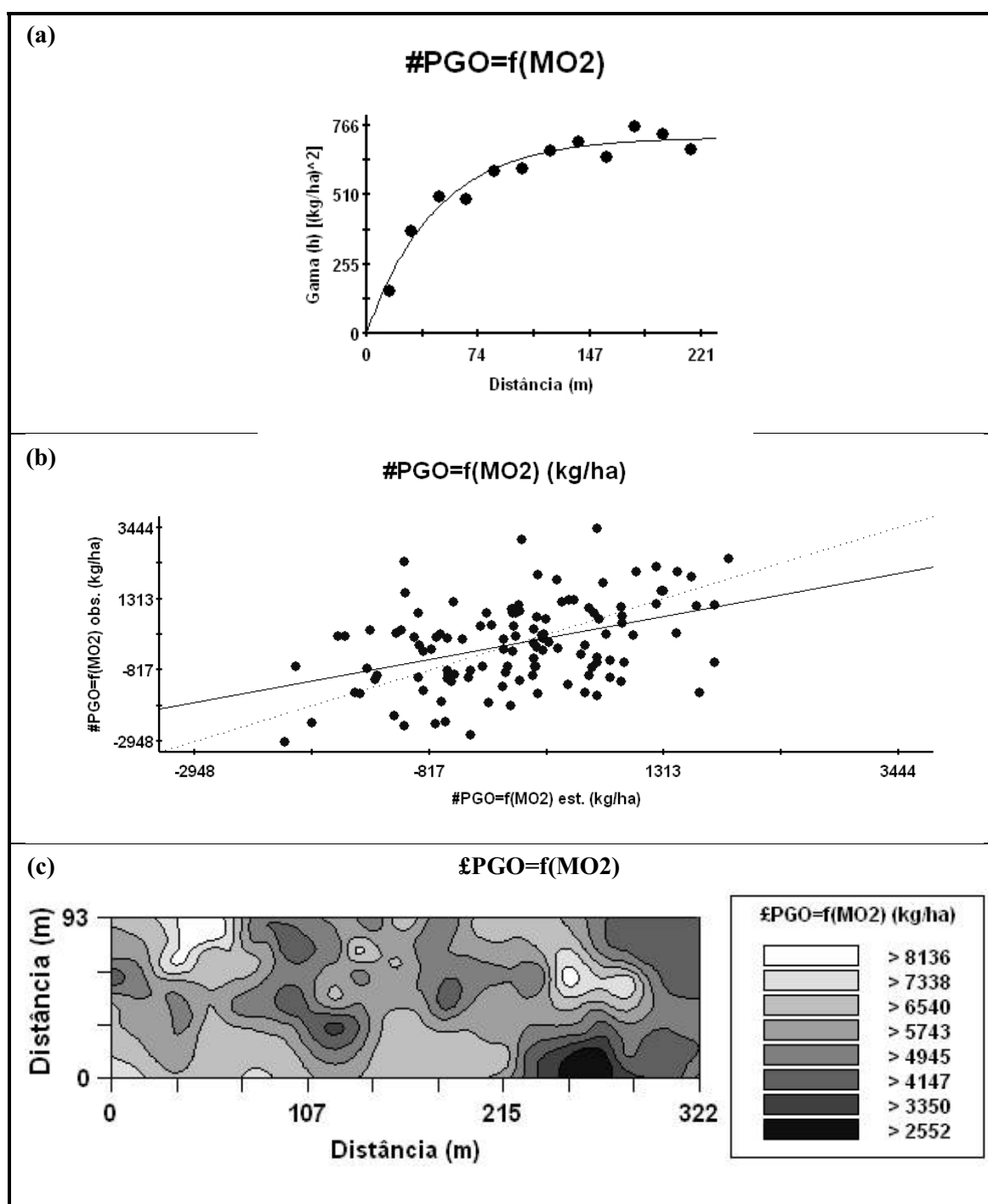


Figura 24: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do MO2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

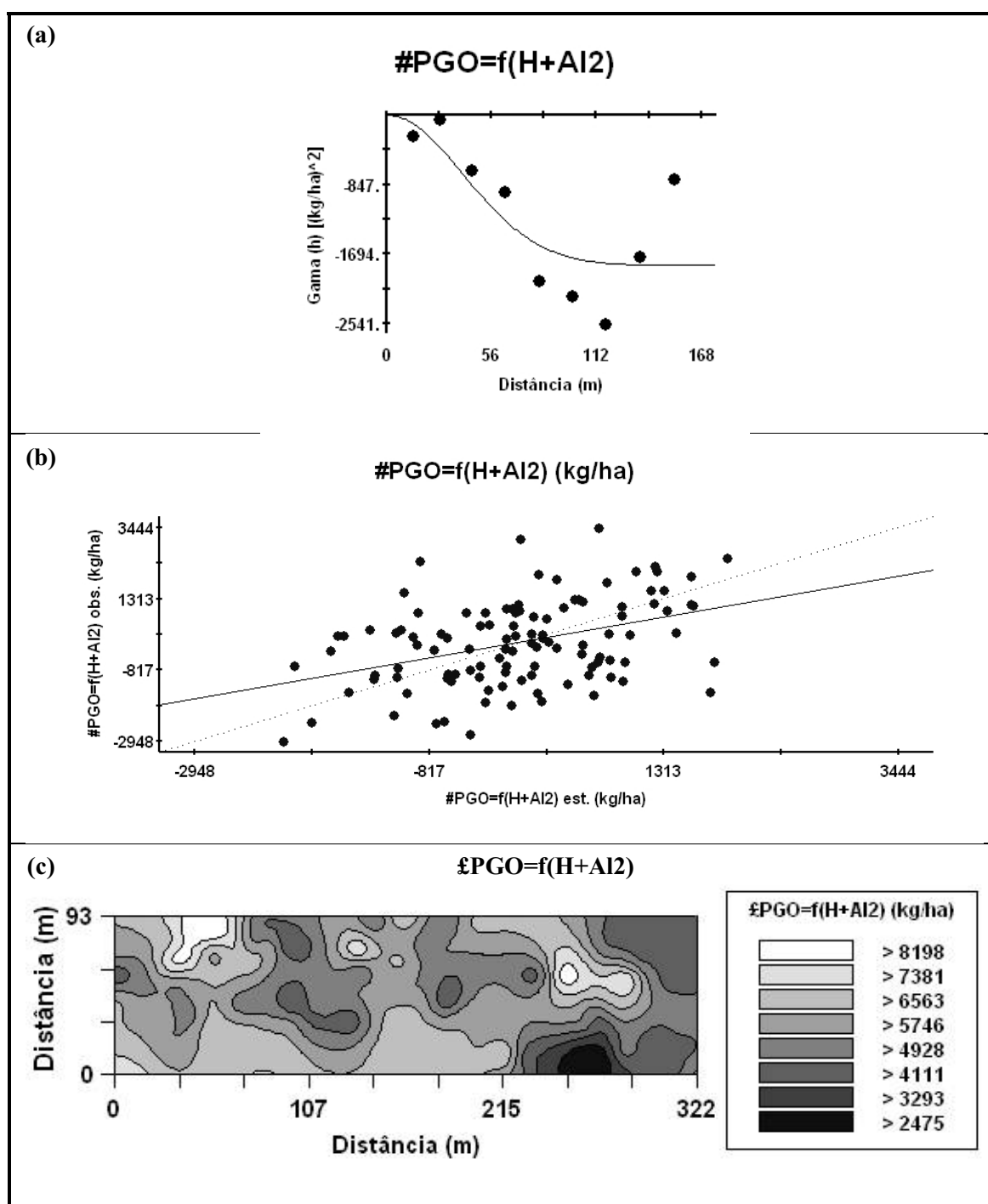


Figura 25: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do H+Al2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

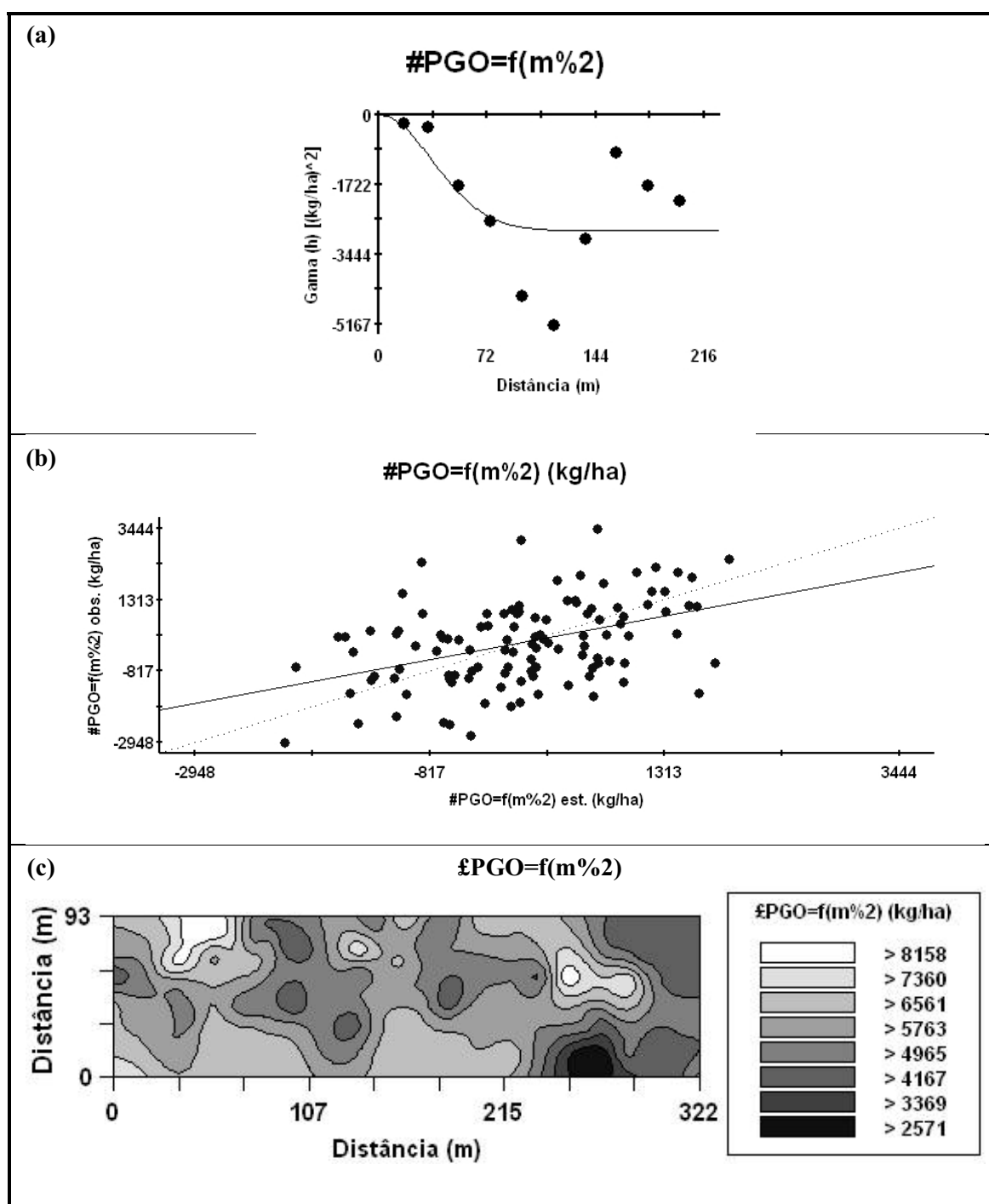


Figura 26: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade do arroz de terras altas (£PGO) em função do m%2 em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob sistema plantio direto

representou o terceiro melhor estimador, sendo que o ajuste resultante conseguiu explicar 42,3% da variabilidade espacial da #PGO. Então, áreas em que a m%2

apresentar valores entre 1,7-27,0%, a #PGO estará variando entre 5763-8158 kg ha⁻¹. No entanto, naquelas onde a m%2 estiver entre 35,4-60,7%, a #PGO oscilará entre 2571-4965 kg ha⁻¹.

Como a interação entre as características químicas não é constante em todos os pontos de uma lavoura, pode haver diferenças de produtividade dentro de uma propriedade, conforme constatado pelos dados ora apresentados. Tal fato indicou heterogeneidade espacial na área estudada, sugerindo a necessidade de definir diferentes glebas de manejo a fim de otimizar a produção agrícola por meio de intervenções que levem em conta as limitações e potencialidades de cada gleba.

5. CONCLUSÕES

1. A cultura irrigada do arroz de terras altas, em plantio direto, possibilitou uma elevada produtividade de grãos, superando em 47% a produtividade média nacional de arroz;
2. Do ponto de vista linear, o número de espiguetas viáveis por panícula apresentou boa correlação direta com a produtividade de grãos de arroz de terras altas. Entretanto, do ponto de vista espacial, o teor da matéria orgânica do solo, quando avaliada na camada 0,10 - 0,20 m, apresentou-se, pela cokrigagem, como bom indicador da produtividade de grãos de arroz;
3. Visando-se auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais empreguem os mesmos atributos estudados da fertilidade do solo, os componentes da produção e a produtividade de grãos de arroz de terras altas, os valores dos alcances recomendados deverão estar entre 40,2 e 181,2 metros.

6. REFERÊNCIAS

ANTUNES, A.M.G.; NUNES, M.A. Effects of aluminum on nutrients solution pH and nitrate/ammonium uptake by triticale. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.20, n.10, p.1391-1401, 1997.

ARAÚJO, A.P. Eficiência vegetal de absorção e utilização de fósforo, com especial referência ao feijoeiro. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V.H., SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, v.1, 2000. p.163-212.

ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E.; CRUSCIOL, C.A.C. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em Selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.1967-1976, 2000.

ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F. SÁ, M.E.; CRUSCIOL, C.A.C. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 6, p. 871-879, 2001.

ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. La Coruña, 1999. 118f. Tese (Doutorado)– Faculdade de Ciências, Universidade de La Coruña, Coruña, 1999.

ÁVILA, C.L.; VIEGAS, L.S.; PARFITT, J.M.B.; TIMM, L.C. Variabilidade espacial da recomendação da calagem para culturas alternativas ao arroz em terras baixas. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17.; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 10.; 2008, Pelotas. **Resumos...**, Pelotas: UFP, 2008. p.1-4.

BASTOS, C.R. IAC 202: arroz de alta produtividade e qualidade para cultura de sequeiro. **O Agrônomo**, Campinas, v.52, n.1, p.24-25, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SOLOS, 1979. (numeração capitulada).

BRESEGHELLO, F. **Tecnologia para arroz de terras altas**. BRESEGHELLO, F., STONE, L.F. (Ed.). Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998. 161p.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.275-86, 2003.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, J.R.P. de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência tecnologia e produção**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588p.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.12, p.1213-1218, 2004.

CASTRO, C.N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas**. 2004. 131f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CAZETTA, D.A.; ARF, O.; BUZETTI, S.; SÁ, M.E.; RODRIGUES, R.A.F. Desempenho do arroz de terras altas com a aplicação de doses de nitrogênio e em

sucessão às culturas de cobertura do solo em sistema de plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.2, p.471-479, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos** – décimo segundo levantamento, setembro 2010. Brasília: CONAB, 2010. 41p.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. 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, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

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

CORÁ, J.E. **The potencial for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tiilage**. 1997. 104f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Agronomia, Michigan State University, East Lansing, 1997.

CORNÉLIO, V.M.O.; REIS, M.S.; SOARES, A.A.; SOARES, P.C.; OLIVEIRA, J.A. Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio na incidência de doenças, produção e qualidade sanitária das sementes de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.1, p.47-52, 2007.

COSTA, M.J.; ROSA JUNIOR, E.J.; ROSA, Y.B.C.J.; SOUZA, L.C.F.; ROSA, C.B.J. Atributos químicos e físicos de um LATOSSOLO sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.29, supl., p.701-708, 2007.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; ZUCARELI, C.; SÁ, M.E.; NAKAGAWA, J. Produção e qualidade fisiológica de sementes de arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.23, n.2, p.287-293, 2001.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; ZUCARELI, C.; SILVA, R. H.; CAVARIANI, C.; NAKAGAWA, J. Produtividade e qualidade fisiológica de sementes de duas cultivares de arroz de terras altas em dois sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.24, n.5, p.1569-1574, 2002.

CRUSCIOL, C.A.C.; MACHADO, J.R.; ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F. Matéria seca e absorção de nutrientes em função do espaçamento e da densidade de semeadura em arroz de terra alta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n.1, p.63-70, 1999.

CRUSCIOL, C.A.C.; MAUAD, M.; ALVAREZ, R.C.; LIMA, E.V.; TIRITAN, C.S. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.4, p.643-649, 2005.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; ARF, O. Produtividade de grãos e exportação de nutrientes de cultivares de arroz irrigadas por aspersão em consequência da época de semeadura. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.2, p.247-257, 2007.

DADALTO, G.G.; FULLIN, E.A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 4º aproximação**. Vitória: SEEA/Incaper, 2001. 180p.

DAVIS, J.C. **Statistics and analysis in geology**. 2.ed. New York: John Wiley, 1986. 646p.

DUARTE, A.P.; QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; FURLANI, P.R.; KANTHACK, R.A.D. Resposta de cultivares de arroz-de-sequeiro à calagem. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.2, p.353-361, 1999.

DURIGON, R. **Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.)**. 2007. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria- UFSM, Santa Maria, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Cultivo do Arroz de Terras Altas**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 2003. (Sistemas de Produção, No. 1). Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm>>. Acesso em: 25 out. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. 247p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306p.

FAGERIA, N.K. Manejo da calagem e adubação do arroz. In: BRESEGHELLO, F.; STONE, L.F. (Ed.). **Tecnologia para o arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998. 161p.

FAGERIA, N.K. Adubação e calagem. In: VIERIA, N.R.A.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**, Santo Antonio de Goiás: EMBRAPA-CNPAF, 1999a. p.329-353.

FAGERIA, N.K. Eficiência do uso de potássio pelos genótipos de arroz de terras altas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.2115-2120, 2000.

FAGERIA, N.K. Nutrição mineral. In: VIEIRA, N.R.A.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA-CNPAF, 1999b. p.173-195.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B. dos. Resposta do arroz irrigado à adubação verde e química no Estado de Tocantins. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.387–392, 2007.

FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P.; BETTI, J.; MELO, M.T.; DEMARIA, I.C.; FURLANI, M. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6.ed. rev. atual. Campinas: IAC, 1998. 396p. (Boletim, 200).

FARINELLI, R.; PENARIOL, F.G.; FORNASIERI FILHO, D.; BORDIN, L. Características agronômicas de arroz de terras altas sob plantio direto e adubação nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.447-454, 2004.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal-SP: Funep, 2006. 589p.

FRANCHINI, J.C. MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.533-542, 1999.

FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; SOUSA, R.O.; ZIMMER, P.D.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz

submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.72-79, 2006.

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

GS⁺: geostatistics for environmental sciences. 7.ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, C.H.; DECHEN, S.C.F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.1-14, 2010.

GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.703-707, 2001.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. Adubação nitrogenada do arroz de terras altas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.210-214, 2003.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; CASTRO, E.M. Comportamento de cultivares de arroz de terras altas no sistema plantio direto em duas profundidades de adubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.22, n.1, p.53-59, 2006.

GUIMARÃES, G.L. **Plantas de cobertura e adubação nitrogenada em cultivares de arroz de terras altas irrigadas no cerrado**. 2008. 53f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

HOERBE, D. **Manejo da cultura do arroz irrigado utilizando técnicas de agricultura de precisão**. 2009. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)- Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

HURTADO, S.M.C.; SILVA, C.A.; RESENDE, Á.V.; PINHO, R.G.V.; INÁCIO, E.S.B.; HIGASHIKAWA, F.S. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.5, p.1351-1359, 2009.

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

JO, J. JANG, Y.S.; KIM, K.Y.; KIM, M.H.; KIM, I.J.; CHUNG, W.I. Isolation of *ALUI-P* gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from *Arthrobacter viscosus*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, New York, v. 239, n.3, p.835-839, 1997.

JOHANN, J.A. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um LATOSSOLO BRUNO Distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.212-219, 2004.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.

MACHADO, L.O.; LANA, Â.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.591-599, 2007.

MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C.; OLIVEIRA, M. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.1, p.55-59, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MARTINS, M.V.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p.147-154, 2009.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique appliquee**. Technip: Memories du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, 1962. v.1-2. 333p.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

MEDEIROS, R.D.; SOARES, A.A.; GUIMARÃES, R.M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.5, p.940-947, 2005.

MEIRA, F.A. BUZETTI, S.; FREITAS, J.G.; ARF, O.; SÁ, M.E. Resposta de dois cultivares de arroz à adubação nitrogenada e tratamento foliar com fungicidas. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.27, n.1, p.91-95, 2005.

MENDONÇA, R.J.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M.A.; OLIVEIRA, J.A.; Capacidade de cultivares de arroz de modificar o pH de soluções nutritivas na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.447-452, 2005.

MENDONÇA, R.J.; CAMBRAIA, J.; OLIVEIRA, J.A.; OLIVA, M.A. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.7, p.843-848, 2003.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.92, n.1, p.1-8, 2000. (Encarte Técnico).

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: fundamentos e estado atual da arte. In: CÂMARA, G.M. **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Produção Vegetal, 2000. p.423-437.

MOLIN, J.P.; VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. DI C.; MASCARIN, L. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.6, n.3, p.309-324, 2007.

MONTANARI, R. **Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico**. 2009. 174f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MONTEZANO, Z.F.; CORAZZA, E.J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p.839-847, 2006.

MOURA NETO, F.P.; SOARES, A.A.; AIDAR, H. Desempenho de cultivares de arroz de terras altas sob plantio direto e convencional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v.26, n.5, p.904-910, 2002.

NEVES, M.B.; BUZETTI, S.; ARF, O.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura em dois cultivares de arroz com irrigação suplementar. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.26, n.4, p.429-435, 2004.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Relações entre o pH do solo e os indicadores de fertilidade e o rendimento de soja em lavouras no sistema plantio direto. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 1CD-ROM.

OLIVEIRA, F.D. **Mapeamento dos teores de óleo e proteína de grãos de soja e análise de sua correlação com atributos do solo**. 2003. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PARFITT, J.M.B.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; CASTILHOS, D.D.; ÁVILA, C.L.; RECKZIEGEL, N.L. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.819-830, 2009.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. 11.ed. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

PINCELLI, A.L.S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. 2004. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PINHEIRO, B.S. Características morfológicas da planta relacionada à produtividade. In: VIEIRA, N.R. de A.; SANTOS, A.B. dos; SANT.ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p.116-147.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285p.

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

REICHERT, J.M.; DARIVA, T.A.; REINERT, D.J.; SILVA, V.R. Variabilidade espacial de PLANOSSOLO e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geostatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.981-988, 2008.

REIS, M.S.; SOARES, A.A.; CORNÉLIO, V.M.O.; SOARES, P.C. Desempenho de cultivares e linhagens de arroz de terras altas sob plantio direto e convencional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.5, p.1435-1440, 2008.

REIS, M.S.; SOARES, A.A.; GUIMARÃES, C.M. Plantio direto em arroz. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.25, n.222, p.49-57, 2004.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.283-293, 2009.

SALVADOR, A. **Comparação de métodos de mapeamento da distribuição espacial da infestação de plantas daninhas**. 2002. 109f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SALVIANO, A.A.C., VIEIRA, S.R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.115-122, 1998.

SANT'ANA, E. V. P. **Comportamento de genótipos de arroz (*Oryza sativa* L.) de terras altas em dois níveis de fósforo em solo e in vitro**. 2000. 143f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiânia, Goiânia, 2000.

SANTOS, A.C.; VILELA, L.C.; BARRETO, P.M.; CASTRO, J.G.D.; SILVA, J.E.C. Alterações de atributos químicos pela calagem e gessagem superficial com o tempo de incubação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.23, n.1, p.77-83, 2010.

SANTOS, T.E.B.; NAKAYAMA, F.T.; ARF, O.; CASSIOLATO, A.M.R. Alterações microbiológicas, de fertilidade e de produtividade do arroz de terras altas em diferentes manejos de solo e água. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.30, n.2, p.203-209, 2008.

SCHLOEDER, C.A.; ZIMMERMAN, N.E.; JACOBS, M.J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.65, n.2, p.470-479, 2001.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS system for elementary statical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v.52, n.3/4, p.591-611, 1965.

SILVA, E.A.; SORATTO, R.P.; ADRIANO, E.; BISCARO, G.A. Avaliação de cultivares de arroz de terras altas sob condições de sequeiro em Cassilândia, MS. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.1, p.298-304, 2009.

SILVA, E.A.; SORATTO, R.P.; OZEKI, M.; ARF, O. Manejo da época de aplicação da adubação potássica em arroz de terras altas irrigado por aspersão em solo de cerrado. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.24, n.5, p.1455-1460, 2002b.

SILVA, I.R.; SMYTH, T.J.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Physiological aspects of aluminum toxicity and tolerance in plants. In: ALVAREZ V, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS. N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG, 2002a. p.277-335.

SILVA, M.R.M. **Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura do arroz de terras altas**. 2006. 100f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

SILVA, P.C.M.; CHAVES, L.H.G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em ALISSOLOS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.15-22, 2010.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars – II: mechanism of aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.16, n.9, p.1717-1732, 1993.

SOUZA, G.S.; LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; OLIVEIRA, R.B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um ARGISSOLO sob pastagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringa, v.30, n.4, p.589-596, 2008b.

SOUZA, G.S.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; ROCHA, W.S.D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um Argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.1, p.073-081, 2010.

SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.885-896, 2000.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; MAGALHÃES, P.G.; CAMPOS, M.C.C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.8, n.2, p.183-190, 2º Semestre 2008a.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.2, p.229-235, 1991.

TISCHNER, R. Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v.23, n.10, p.1005-1024, 2000.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURTI, N.; CARNEIRO, L.F.; ALOVISI, A.A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.29, n.1, p.9-16, 2007.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-94, 1985.

UEXKULL, H.R.; MUTER, T. Global extent, development and economic impact of acid soils. In: DATE, R.A.; GRUNDON, N.J.; RAYMENT, G.E.; PROBERT, M.E. (Ed). **Plant-soil interactions at low pH: principles and management**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1995. p.5-19.

VALERIANO, M.M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p. 997-1005, 2001.

VALLADARES, G.S.; GOMES, E.G.; MANGABEIRA, J.A.C.; GREGO, C.R.; BATISTELLA, M.; MIRANDA, E.E.; HOTT, M.C. Geoestatística na avaliação da fertilidade do solo e eficiência técnica para a cultura do arroz em Machadinho D'oeste, RO. In: FERTBIO, 5, 2006, Bonito. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G.; NIELSEN, D.R.; The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.1, p.175-184, 1983.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2004. 449p.

VIEIRA, A.R.; GONZALEZ, A.P. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.127-138, 2003.

VIEIRA, N.R.; CARVALHO, J.L.V. Qualidade tecnológica. In: VIEIRA, N.R. de A.; SANTOS, A.B. dos; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 633p.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.1, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.4, p.1040-1048, 1991.

VILLELA, O.V. **Níveis de nitrogênio em arroz pré-germinado**. 2000. 103f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L.A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.1184-1192, 2008.

YANAI, J.; LEE, C.K.; KAHO, T.; IIDA, M.; MATSUI, T.; UMEDA, M.; KOSAKI, T. Geostatistical analysis of soil chemical properties and Rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.47, n.2, p.291-301, 2001.

ZARATIN, C.; MELO, L. P.; PANTANO, A. C. Efeitos de doses e do parcelamento de potássio em cultivares de arroz irrigado por aspersão: produção de sementes. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 1999, Botucatu. **Resumos...** São Paulo: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 1999. p.202.