

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL  
DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E DA  
PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS UTILIZANDO AS  
FERRAMENTAS DA AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Charles Bolson Pontelli**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2006**

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS  
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E DA  
PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS UTILIZANDO AS  
FERRAMENTAS DA AGRICULTURA DE PRECISÃO.**

**por**

**Charles Bolson Pontelli**  
Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2006**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS  
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E DA  
PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS UTILIZANDO AS  
FERRAMENTAS DA AGRICULTURA DE PRECISÃO.**

elaborada por  
**Charles Bolson Pontelli**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**José Fernando Schlosser, Dr. (UFSM)**

---

**Fabiane Vezzani, Dr<sup>a</sup>. (UERGS)**

Santa Maria, 12 de Janeiro de 2006.

## **DEDICO**

### **AOS MEUS PAIS:**

Darci, pela sua compreensão em minha escolha pelo estudo, e conseqüente ausência ao longo destes anos. Espero algum dia retribuir a altura o seu ato.

Tereza, pelos conselhos que me colocaram no ensino superior “e olha onde nós chegamos”. Sou eternamente grato.

## **OFEREÇO**

A minha esposa Ana que compartilhei o convívio durante este trabalho e que me apoiou em todos os momentos, compreendeu minhas ausências e omissões, dedico o meu amor.

A filha Louiseanne (minha querida Lulu), talvez na euforia de sua linda infância não tenha percebido a minha ausência. Agradeço seu carinho e que no futuro este trabalho lhe inspire nas suas conquistas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela vida, pela família, pelos amigos...

A Minha querida irmã Sheila e cunhado Elci, agradeço o apoio sempre presente. Mana, você é minha fonte inspiradora de empenho e determinação.

Ao professor Telmo J. C. Amado um agradecimento especial pela acolhida na iniciação científica, pelos anos de convívio, orientação, ensinamentos transmitidos e acima de tudo a amizade.

A Família Sulzbach, um agradecimento especial pela acolhida que sempre encontramos em Palmeira das Missões.

Ao Prof. José Fernando Schlosser, pela co-orientação, conselhos e amizade .

Ao meu sócio, Ademir Wendling, agradeço o apoio, os ensinamentos, auxílios, sugestões e principalmente pela amizade e confiança.

Ao amigo Antônio Luis Santi (“Galo da Palmeira”). Sabes que além do vasto conhecimento da Ciência Agrária, tem uma grande habilidade no uso das palavras. Um agradecimento especial pelas suas contribuições neste trabalho.

Ao amigo Dr. João E. M. Viana (Embrapa Milho e Sorgo), pelos ensinamentos e auxílio neste trabalho, um agradecimento especial.

Aos professores do Setor de Manejo do Solo, Flávio Eltz e Thomé Lovato, agradeço a confiança, os ensinamento e a amizade.

Ao grupo de Bolsistas do Setor de Uso Manejo e Conservação do Solo, o mérito deste trabalho divido com os amigos.

A amiga Fabiane Vezzani, pelos ensinamentos, convívio, amizade.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, que me concedeu esta oportunidade de formação.

Ao amigo Ercelino, pela competência e seriedade com que condução os trabalhos na secretaria do PPGEA.

Aos professores do PPGEA e PPGCS, agradeço os ensinamentos transmitidos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo.

Ao amigo Luis Finamor (Fifi), pela amizade, pelos auxílios no laboratório, um agradecimento especial.

Ao professor Carlos Alberto Pires, pelo auxílio e ensinamentos em geoestatística.

Aos colegas dos Programas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ciência do Solo pelas discussões, pelas dicas, a troca de experiência e o convívio foram muito válidos.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho um muito obrigado.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS, UTILIZANDO AS FERRAMENTAS DA AGRICULTURA DE PRECISÃO.

AUTOR: CHARLES BOLSON PONTELLI  
ORIENTADOR: PROF. DR. TELMO JORGE CARNEIRO AMADO  
Local e data da Defesa: Santa Maria, 12 de Janeiro de 2006.

Neste trabalho foi investigada a variabilidade espacial existente nos atributos do solo utilizados na avaliação da fertilidade dos solos, bem como seu grau de participação na variabilidade da produtividade das culturas. Foi conduzido um experimento por 5 anos (2000 a 2005) em uma área comercial de 57 ha no município de Palmeira das Missões em um Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999). Em maio de 2002 foram coletadas amostras de solo georeferenciadas em malha regular de 100 x 100 metros a uma profundidade de 0 a 10 cm. As safras de soja 2000/01, milho 2001/02, soja 2002/03, trigo 2003, soja 2003/04 e milho 2004/05 foram analisadas. Os dados de produtividade foram coletados com uma colhedoura com sistema de tomada e registro de informações georeferenciadas. Para cada ponto de coleta de solo foi calculada uma produtividade média utilizando-se os dados num raio de 30 m ao redor do ponto. Os dados de produtividade e solo foram analisadas pela matriz de correlação de Pearson. Para a cultura da soja nas safras de 2000/01 e 2002/03 foram determinadas equações polinomiais quadráticas médias, onde se determinou os valores médios do pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P) e da produtividade para cinco classes: muito baixa (MB), baixa (B), média (M), alta (A) e muito alta (MA). Para o fósforo foram adotadas as classes propostas por Schlindwein, (2003) e para pH e MO usou-se classes adaptadas da Comissão (2004). Através das equações ajustadas foi calculado a máxima eficiência técnica (MET) e a máxima eficiência econômica (MEE) que foi obtida considerando 90 % do rendimento relativo. Os atributos químicos do solo e a produtividade apresentaram baixas correlações. A argila apresentou correlação negativa de 0.25 a 0.46 com as

produtividades de milho 2005 e soja 2004 respectivamente. Os valores de MET para P, pH e MO foram de 14,4 mg dm<sup>-3</sup>; 5,9 e 4,1%, respectivamente. Valores acima destes, podem incorrer em decréscimo de produtividade. A MEE para P, pH e MO foram de 4,4 mg dm<sup>-3</sup>; 5,5 e 3,2%, respectivamente.

**Palavras chave:** agricultura de precisão, mapas de produtividade, geoestatística, manejo do solo, curva de resposta, máxima eficiência técnica, máxima eficiência econômica.



## ABSTRACT

Master of Science Dissertation  
Graduate Program in Agricola Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **CHARACTERIZATION OF THE SPATIAL VARIABILITY OF THE SOIL'S CHEMICAL CHARACTERISTICS AND PRODUCTIVITY OF CULTURES, USING THE TOOLS OF PRECISION AGRICULTURE.**

AUTHOR: CHARLES BOLSON PONTELLI  
ADVISER: PROF. DR. TELMO JORGE CARNEIRO AMADO  
Dissertation place and date: Santa Maria, January 12, 2006.

In this work were investigated the spatial variability existent on the soil attributes utilized for soil fertility evaluation and its grade of participation on the yield crop variability. An experiment was conducted over five years (2000 to 2005) in an area of 57 ha in the municipality of Palmeira das Missões in a Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999). Geopositioned soil samples were collected in May 2002, with a regular grid of 100x100 meters and at a depth of 0 to 10 cm. Yield data of soybean 2000/01, corn 2001/02, wheat 2002, soybean 2002/03, wheat 2003, soybean 2003/04 and corn 2004/05 were analyzed. The yield data was collected with a machine equipped with a system that take and register georeferenced data. Yield averages for each soil sample point were calculated, using yield data collected at a radius of 30 meters around the point. The yield and soil data were analyzed using the Pearson correlation Matrix. Average quadratic polynomial equations were calculated for the yields of soybean 2001/02 and 2003/03, where the nutrient pH, Organic Mater (OM), Phosphorus (P) and yield average were divided into five categories: very low (VL), low (L), mean (M), high (H) and very high (VH). For P was used categories proposed by Schlindwein (2003), for pH and OM are used categories adapted from Comissão (2004). Maximum efficiency technical (MET) and maximum economical efficiency (MEE) considering 90% of relative yield are calculated using the adjusted equations. A small correlation was found between the soil chemical attributes and the yield productivity. A negative correlation from 0,25 to 0,46 was found between the clay texture and corn yield 2005 and soybean yield 2004 respectively. The average soybean yield response to soil attributes curves shows the values of maximum technical efficiency (MTE) of the attributes in the soil. The MTE for P, pH and OM are 14,4 mg dm<sup>-3</sup>; 5.9 and 4.1%, respectively. Higher values of

MTE can reduce the crop yield. The MEE for P, pH and OM are 4,4 mg dm<sup>-3</sup>; 5.5 e 3.2%, respectively.

**Key Words:** precision agriculture, yield maps, geoestatistic, soil management, response curves, maximum technical efficiency, maximum economical efficiency.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

<b>Tabela 1</b> – Histórico de culturas utilizadas nas base experimental – Palmeira das Missões, RS.....	26
<b>Tabela 2</b> – Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade, em seis safras – Palmeira das Missões/RS. ....	33
<b>Tabela 3</b> – Coeficientes de correlação entre os dados de produtividade nas seis safras - Palmeira das Missões/RS. ....	33
<b>Tabela 4</b> – Parâmetros geoestatísticos dos seis conjuntos de dados de produtividade considerados no estudo – Palmeira das Missões/RS. ....	40

### CAPÍTULO 2

<b>Tabela 1</b> – Histórico de rotação de culturas utilizadas na base experimental – Palmeira das Missões, RS. ....	59
<b>Tabela 2:</b> Estatística descritiva dos atributos químicos de solos avaliados – Palmeira das Missões, RS. ....	62

<b>Tabela 3</b> - Classificação da Comissão (2004) e Schlindwein, (2003) e situação da área referente aos teores de fósforo – Palmeira das Missões, RS. ....	64
<b>Tabela 4:</b> Situação dos conteúdos de argila, matéria orgânica e valores de pH em relação aos dados adaptados da Classificação (2004), - Palmeira das Missões, RS. ....	64
<b>Tabela 5:</b> Classificação da Comissão (2004), e situação da área referente às concentrações de potássio no solo – Palmeira das Missões, RS. ....	65
<b>Tabela 6:</b> Classificação da Comissão (2004), e situação da área em relação aos teores de cálcio e magnésio – Palmeira das Missões, RS. ....	65
<b>Tabela 7:</b> Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados – Palmeira das Missões/RS. ....	67

### **CAPÍTULO 3**

<b>Tabela 1</b> – Histórico de rotação de culturas utilizadas na área de estudo – Palmeira das Missões, RS. ....	88
<b>Tabela 2</b> - Estatística descritiva dos dados de atributos do solo e produtividade. ....	92
<b>Tabela 3</b> - Correlações entre dados de atributos químicos do solo e produtividade obtidos através de matriz de correlação de Pearson. ....	93

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>Figura 1</b> – Localização da base experimental em relação a capital do Estado (Porto Alegre) e a Universidade Federal de Santa Maria (Santa Maria) no Estado do Rio Grande do Sul. ....	27
<b>Figura 2</b> – Vista aérea da Granja São Bento (A) e da área de estudo (B) – Palmeira das Missões, RS. ....	27
<b>Figura 3</b> – Colhedora utilizada para a colheita georreferenciada e detalhe da cultura da soja na safra 2002/03 – Palmeira das Missões, RS. ....	28
<b>Figura 4</b> – Detalhe do sensor de rendimento Micro Track (A), leitora com cartão de dados PCMCIA (B) para o armazenamento de dados e antena receptora GPS (C) - componentes envolvidos na tecnologia embarcada da colheitadeira utilizada para a obtenção dos dados de produtividade. ....	29
<b>Figura 5</b> - Precipitações ocorridas durante os seis anos de avaliação – Palmeira das Missões, RS. ....	34
<b>Figura 6</b> - Histograma de distribuição da frequência para produtividade da cultura da soja na safra 2000/01 (A), milho na safra 2001/02 (B), soja na safra 2002/03 (C) e da cultura do trigo na safra 2003 (D) – Palmeira das Missões, RS. ....	36
<b>Figura 7</b> - Histograma de distribuição da frequência para produtividade da cultura da soja na safra 2004 e do milho na safra 2005 - Palmeira das Missões, RS. ....	37

<b>Figura 8</b> – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de soja 2001 (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões – RS. ....	41
<b>Figura 9</b> – Gráfico do semivariograma experiemntal e da validação cruzada da produtividade de soja 2003 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS. ....	42
<b>Figura 10</b> – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de soja 2004 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS. ....	43
<b>Figura 11</b> – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de trigo 2003 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS. ....	44
<b>Figura 12</b> – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de milho 2002 (comportamento isotrópico) - Palmeira das Missões – RS. ....	45
<b>Figura 13</b> – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de milho 2005 (comportamento isotrópico) - Palmeira das Missões – RS. ....	46

## **CAPÍTULO 2**

<b>Figura 1</b> – Mapa da localização da base experimental (esquerda), e a vista aérea da propriedade (direita). ....	59
<b>Figura 2</b> – Mapa da área de estudo com os pontos georeferenciados e detalhe da metodologia utilizada para a coleta de solo georeferenciadas amostragem – Palmeira das Missões, RS. ....	60

<b>Figura 3:</b> Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada de MO (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS. ....	68
<b>Figura 4:</b> Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de MO e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das missões/RS. ....	69
<b>Figura 5:</b> Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da argila (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS. ....	71
<b>Figura 6:</b> Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de argila e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das missões/RS. ....	72
<b>Figura 7:</b> Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do fósforo (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS. ....	73
<b>Figura 8:</b> Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de fósforo e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS. ....	74
<b>Figura 9:</b> Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do potássio (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS. ....	75
<b>Figura 10:</b> Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de fósforo e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS. ....	76
<b>Figura 11:</b> Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do pH em H <sub>2</sub> O (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS. ....	77
<b>Figura 12:</b> Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de pH em H <sub>2</sub> O e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS. ....	78

### CAPITULO III

<b>Figura 1</b> – Detalhe da colheita georeferenciada da cultura da soja e o exemplo de um mapa de pontos de colheita obtidos durante a obtenção dos dados - (Fonte: Luciano Sulzbach Proprietário e AGCO do Brasil). .....	89
<b>Figura 2</b> – Mapa da base experimental com os pontos georeferenciados e detalhe da metodologia utilizada para a coleta de solo georeferenciada amostragem – Palmeira das Missões, RS. ....	89
<b>Figura 3</b> – Detalhe de um raio de busca obtido pelo programa CR Campeiro5, utilizado para a obtenção dos dados médios pontuais de produtividade – Palmeira das Missões, RS. ....	90
<b>Figura 4</b> - Histogramas de precipitações ocorridas no período considerado no estudo (Fonte: informações pessoais do Sr. Luciano Sulzbach). ....	94
<b>Figura 5</b> - Relação entre os teores de argila do solo e as produtividades de Soja 2001(A); Milho 2002 (B); Soja 2003 (C); Trigo 2003(D); Soja 2004 (E); e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS. ....	95
<b>Figura 6</b> - Relação entre os teores de pH em H <sub>2</sub> O do solo e as produtividades de soja em 2001(A); Milho 2002 (B); Soja 2003 (C); Trigo 2003 (D); Soja 2004 (E) e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS. ....	97
<b>Figura 7</b> - Relação entre os teores de Fósforo do solo e as produtividades de soja em 2001 (A); Milho 2002 (B); soja em 2003 (C); trigo em 2003 (D); soja em 2004 (E) e milho em 2005 (F)– Palmeira das Missões, RS. ....	98
<b>Figura 8</b> - Relação entre os teores de matéria orgânica do solo e as produtividades de soja em 2001 (A); Milho 2002 (B); soja em 2003 (C); Trigo 2003 (D); Soja 2004 (E) e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS. ....	100



<b>Figura 9</b> – Curva de resposta média da soja em função do fósforo no solo, equação de resposta e $r^2$ da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005. ....	103
<b>Figura 10</b> – Curva de resposta média da soja em função do pH no solo, equação de resposta e $r^2$ da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005. ....	103
<b>Figura 11</b> – Curva de resposta média da soja em função da matéria orgânica no solo, equação de resposta e $r^2$ da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005. ....	104

## ÍNDICE

INTRODUÇÃO GERAL .....	20
CAPÍTULO I.....	22
INTRODUÇÃO .....	25
MATERIAL E MÉTODOS .....	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
CONCLUSÕES .....	49
AGRADECIMENTOS .....	50
LITERATURA CITADA .....	51
CAPÍTULO II.....	55
INTRODUÇÃO .....	58
MATERIAL E MÉTODOS .....	59
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
CONCLUSÕES .....	80
AGRADECIMENTOS .....	80
LITERATURA CITADA .....	81
CAPÍTULO III .....	83
INTRODUÇÃO .....	87
MATERIAL E MÉTODOS .....	88
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
CONCLUSÕES .....	106
AGRADECIMENTOS .....	107
LITERATURA CITADA .....	108

## INTRODUÇÃO GERAL

O manejo dos solos agrícolas da região Sul do Brasil apresenta histórico de grandes evoluções, desde o seu princípio. Esta história tem seu início com a chegada dos imigrantes europeus no início do século passado, os quais trabalhavam os solos com a derrubada das matas que era seguida por queimadas e sucessivos cultivos com intenso revolvimento do solo. Neste sentido, em poucos anos a capacidade produtiva dos solos era exaurida, e a produção avançava sobre as áreas de mato existente (Mielniczuk, 2003).

Mais tarde, por volta de década de 60, com o advento da mecanização e a implantação de algumas práticas de correção dos solos ocorreu rápida expansão da agricultura baseada nos monocultivos de soja e trigo. Paralelos a este desenvolvimento agravaram-se os problemas decorrentes do mau uso do solo causados pelo emprego de práticas inadequadas de manejo que baseadas no monocultivo (soja/trigo), com queima de resíduo e intenso preparo, resultaram em redução dos teores de matéria orgânica, perdas de solos e redução do potencial produtivo dos solos.

A década de 80, foi marcada por grandes mudanças no tocante ao manejo dos solos. Neste período, ocorreram significativas mudanças que passaram desde a redução, e em um período posterior, a eliminação da queima de resíduos, utilização de culturas de cobertura e redução da mobilização do solo.

Nos anos 90, dá-se um grande marco dentre as práticas de manejo do solo. A expansão do sistema de semeadura direta na palha proporciona significativas evoluções em nível de controle da erosão e correção dos solos com conseqüentes incrementos significativos de produtividades.

No final dos anos 90, presencia-se, ainda que de uma forma um pouco tímida, a inserção de tecnologias embarcadas em máquinas e implementos agrícolas que, para o momento, tratava-se como revolucionária para a agricultura. A nova tecnologia composta por sensores, computadores e receptores de sinal GPS, foi denominada de Agricultura de Precisão. Esta tecnologia possibilitou o gerenciamento e ampliação do conhecimento dos campos de produção com avaliação e tratamento da variabilidade espacial até então presente na fertilidade do solo e na produtividade, mas sem alternativa prática para sua mensuração em larga escala.

Cria-se então certo grau de expectativa em torno dos benefícios possíveis de se obter com tais equipamentos. No entanto, por questões como: limitados conhecimentos técnicos sobre o tema, insuficiência de dados de pesquisa e altos custos iniciais de implantação do sistema, tem-se uma lenta adoção e disseminação desta ferramenta. Esta tecnologia passou por um período com pouca expressão a nível comercial. Paralelo a este cenário, passaram a ser realizados trabalhos de pesquisa que se propunham a investigar os potenciais desta tecnologia para a agricultura nacional. A base de conhecimento sobre a agricultura de precisão avançou ao longo dos anos, possibilitando hoje a sua utilização como importante ferramenta de auxílio na identificação da variabilidade da produtividade e de suas causas, bem como no seu tratamento.

Hoje, várias tecnologias proporcionam o desenvolvimento da agricultura nacional. O gerenciamento das unidades de produção assimilou novos subsídios para a ampliação do conhecimento e o entendimento da variabilidade espacial e temporal dos atributos dos solos e das plantas e suas relações. A possibilidade de manejar essa variabilidade e tornar possível sua minimização é o grande desafio e, por que não, o alicerce prático da aplicação dos conceitos da agricultura de precisão.

Este trabalho foi realizado em uma área comercial de 57 hectares, localizada no município de Palmeira da Missões – RS. Esta área é manejada há cinco anos com ferramentas de agricultura de precisão.

Este trabalho teve como objetivos gerais investigar:

- Presença da variabilidade espacial da produtividade e de atributos químicos de solo em uma área agrícola comercial;
- Amplitude da variabilidade de atributos de solo da produtividade das culturas de soja, milho e trigo da área em estudo;
- Grau de dependência espacial dos atributos de solo e da produtividade;
- Correlação existente entre os atributos de solo e as produtividades avaliadas;
- Os valores de Máxima eficiência técnica (MET) e Máxima eficiência econômica (MEE), para os principais atributos de fertilidade do solo, através das curvas médias de resposta da planta.

## **CAPÍTULO 1**

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL HORIZONTAL E  
TEMPORAL, DA PRODUTIVIDADE EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB  
PLANTIO DIRETO.**

**RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade espacial horizontal e temporal da produtividade de soja, milho e trigo, em uma área de 57 hectares localizada no município de Palmeira das Missões – RS, onde há cinco anos são realizados estudos de Agricultura de Precisão. Para o estudo foram utilizados dados de produtividade de seis cultivos realizados entre os anos de 2000 a 2005. A coleta dos dados de produtividade foi realizada utilizando uma colhedoura com sistema de tomada e registro de informações georeferenciadas. As informações obtidas a campo foram avaliadas segundo parâmetros estatísticos e geoestatísticos a fim de conhecer a amplitude da variabilidade espacial e a sua dependência espacial, bem como seu comportamento ao longo dos anos. Os resultados obtidos demonstraram que a base experimental apresenta grande variabilidade espacial horizontal de produtividade e que esta é estruturada ao longo dos anos. Em anos com déficit hídrico verificou-se o aumento da variabilidade espacial da produtividade, expressando indícios que limitações de ordem física do solo estão prevalecendo nestas condições. A área expressou dependência espacial ampla com valores entre 154 e 798 metros nos diferentes cultivos avaliados.

**Palavras chave:** agricultura de precisão, variabilidade espacial, geoestatística, mapa de produtividade.

## **Characterization of the Horizontal and Temporal Spatial Variability of Productivity in a Latossolo Vermelho with a No Tillage System.**

### **Summary**

The objective of this work was to analyze the horizontal and temporal variability yield of soybean, corn and wheat in a 57 ha area in the municipality of Palmeira das Missões – RS, where have five years of studies of precision agriculture. Yield data of six cultures from 2000 – 2005 was used for this study. The yield data was collected using a machine equipped with a system that measure and register the georeferenced information. The data was studied using statistical and geostatistical parameters to analyze the width of the spatial variability and its spatial dependence as well as its behavior over the years. The results show that the studied area presents great variability in horizontal spatial productivity that is maintained over time. In years of drought the spatial variability was increased indicating physical limitations of the soil. This area presents consistent spatial dependence between correlation levels with a distance of 154 to 798 meters.

**Key words:** precision agriculture, spatial variability, geostatistic, yield map.

## INTRODUÇÃO

O solo é um sistema complexo, dinâmico e heterogêneo, onde sua qualidade é a expressão da interação entre os subsistemas minerais, plantas e organismos edáficos (Vezzani, 2001). O histórico de manejo pode conduzir, gradualmente, a uma melhoria da qualidade do solo agrícola até alcançar a excelência de qualidade. Assim como, em sentido oposto pode conduzir a um processo de regressão da qualidade até alcançar a degradação.

Como o solo é heterogêneo, em uma mesma lavoura é possível encontrar subáreas com diferentes níveis de qualidade (organização do sistema), embora as práticas de manejo adotadas tenham sido planejadas para aplicação uniforme. Por exemplo, a eficiência de uma fertilização mineral pode ser comprometida em sub-áreas compactadas, que restringem o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água. Neste exemplo, somente a análise química do solo não será uma ferramenta apropriada para manejar eficientemente o solo desta sub-área havendo necessidade de uma visão holística do solo, principalmente quanto à interação das características químicas, físicas e biológicas que irão determinar a qualidade do solo (Amado et al. 2005).

Em nível de experimentos, isto pode ser feito através das avaliações como, avaliações químicas - disponibilidade dos nutrientes - (Carvalho et al. 2003; Albuquerque et al, 1996; Berg & Klant, 1997), quanto a qualidade física - densidade, permeabilidade, porosidade, resistência à penetração, agregação, desenvolvimento radicular - (Libardi et al, 1996; Souza et al, 2001) e em relação a sua qualidade e atividade biológica - respiração do solo, estoque de carbono, índice de cobertura do solo, entre outros (Vezzani, 2001; Conceição, 2001; Corazza, 1999).

Em nível de lavoura, tais determinações tornam-se de difícil aplicabilidade. Alternativamente, autores como Willis et al. (1999), Zhang et al. (1999), Dampney & Moore (1999), sugerem a observação do histórico do desenvolvimento vegetal, seja das culturas de cobertura ou das culturas econômicas, dos últimos três ou cinco anos. Nasquelas sub-áreas onde se constata um desenvolvimento vegetal insatisfatório deve-se realizar determinações de indicadores chave de qualidade do solo e uma vez diagnosticado o fator ou fatores restritivos, concentrar intervenções corretivas de manejo.

Várias são as formas de investigação da variabilidade dos fatores que interferem na produção. Destacam-se amostragens de solo em malha, mapeamento de plantas daninhas, condutividade elétrica do solo, sendo a forma mais difundida o mapeamento da produtividade



por ocasião da colheita, pois esta é tida como a expressão biológica dos fatores envolvidos no processo produtivo e é considerado como uma das fases que apresenta maior facilidade de execução (Balastreire, 1998).

Recentemente, através do uso das ferramentas de agricultura de precisão, tem sido possível a geração de mapas com a distribuição espacial da produtividade das culturas (mapa de colheita) e dos atributos do solo. Isso permite fazer um acompanhamento sobre aspectos ligados a qualidade do solo em áreas de lavouras comerciais e seus impactos no rendimento das culturas. Com isto, pode-se gerar um diagnóstico de problemas específicos dentro de uma lavoura, que poderão demandar intervenções de manejo diferenciadas.

Santi et al. (2005) complementam que essa ferramenta, da agricultura de precisão, onde se expressam os potenciais produtivos de forma gráfica e por meio de mapas, é uma possibilidade de ampliar o aspecto gerencial na propriedade por garantir uma visualização da real expressão produtiva das culturas, mesmo em áreas de plantio direto estabelecido e níveis de fertilidade elevados, onde tem se percebido a existência de uma grande variabilidade espacial no rendimento em áreas comerciais no Estado do RS.

Segundo Han et al.(1994) o mapa de produtividade é um importante componente para a agricultura de precisão, pois identifica e quantifica a variabilidade da produtividade das culturas e auxilia os processos de gerenciamento. Queiroz et al. (2000) consideram que os mapas de produtividade da cultura podem ser utilizados como ponto de partida na averiguação das causas da variabilidade da produtividade bem como ser parâmetro para as tomadas de decisão de manejo.

Tal compreensão requer o acompanhamento e a análise de mapas gerados por mais de uma única safra para que se contemple uma possível variabilidade temporal dos fatores que influenciam na produtividade durante safras seguidas (Fraisse, 2003).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo o estudo do grau de dependência espacial da variabilidade de produtividade a variabilidade horizontal e temporal da produtividade de seis mapas de produtividade de três diferentes culturas obtidos entre os anos 2000 e 2005, uma área comercial manejada com técnicas e princípios de agricultura de precisão.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O presente estudo foi realizado em uma área comercial de 57 hectares da Granja São Bento, localizada no município de Palmeira das Missões, km 15 da BR-468, situada entre as

coordenadas 262.752 (E) a 263.962 (E), e 6.918.712 (N) a 6.920.149 (N), numa altitude aproximada de 600 metros.

Esta área é pioneira no Estado do Rio Grande do Sul no emprego de tecnologias na agricultura, envolvendo pesquisas baseadas no gerenciamento através das ferramentas de agricultura de precisão há mais de cinco anos na propriedade. Cabe a ressalva, de que nessa propriedade, vários trabalhos de pesquisa já foram ou estão sendo realizados o que culminou com uma dissertação de mestrado, um trabalho de pós-doutorado, uma tese de doutorado em fase de conclusão e uma dissertação de mestrado em andamento, além de vários trabalhos de iniciação científica.

Conforme a EMBRAPA (1999), essa região situa-se na zona da escarpo arenito-basáltico do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 metros e elevados teores de argila (Figuras 1, 2A e 2B).

O sistema de manejo empregado é de plantio direto há aproximadamente dez anos, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno, e as culturas da soja e do milho, no verão, obedecendo um plano de rotação de culturas (Tabela 1).

**Tabela 1** – Histórico de culturas utilizadas na base experimental – Palmeira das Missões, RS.

<b>ANOS AGRÍCOLAS</b>					
	<b>2000/01</b>	<b>2001/02</b>	<b>2002/03</b>	<b>2003/04</b>	<b>2004/05</b>
<b>INVERNO</b>	Aveia	Nabo Forrageiro	Trigo	Trigo	Consórcio*
<b>VERÃO</b>	Soja	Milho	Soja	Soja	Milho

\* Aveia + Nabo Forrageiro + Tremoço Azul

O clima da região, segundo a classificação de KÖEPPEN é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média normal do mês mais quente ocorre em janeiro (24,6°C) e a do mês mais frio em junho (12,9°C). Quanto à média normal das máximas, esta é de 30,4°C (janeiro) e de 19,2°C em junho. A média das temperaturas mínimas do mês mais quente é de 18,7 °C em dezembro e de 9,3 °C a do mês mais frio em junho. As chuvas apresentam boa distribuição em praticamente todos os meses do ano, sem estação seca definida, os índices pluviométricos anuais são 1.500 mm a 1750 mm (BRASIL, 1983).



**Figura 1** – Localização da base experimental em relação a capital do Estado (Porto Alegre) e a Universidade Federal de Santa Maria (Santa Maria) no Estado do Rio Grande do Sul.



**Figura 2** – Vista aérea da Granja São Bento (A) e da área de estudo (B) – Palmeira das Missões, RS.

Os dados georeferenciados de produtividade georeferenciados das culturas de soja, de milho e de trigo foram obtidos desde a safra 2000/01, através do auxílio de uma colhedoura Massey Ferguson equipada com o Sistema Fieldstar de Agricultura de Precisão (Figura 3), o qual congrega um conjunto de ferramentas como sensores de rendimento Micro Track (Figura

4A), cartão de dados PCMCIA para o armazenamento dos dados (Figura 4B), e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global – GPS (Figura 4C).

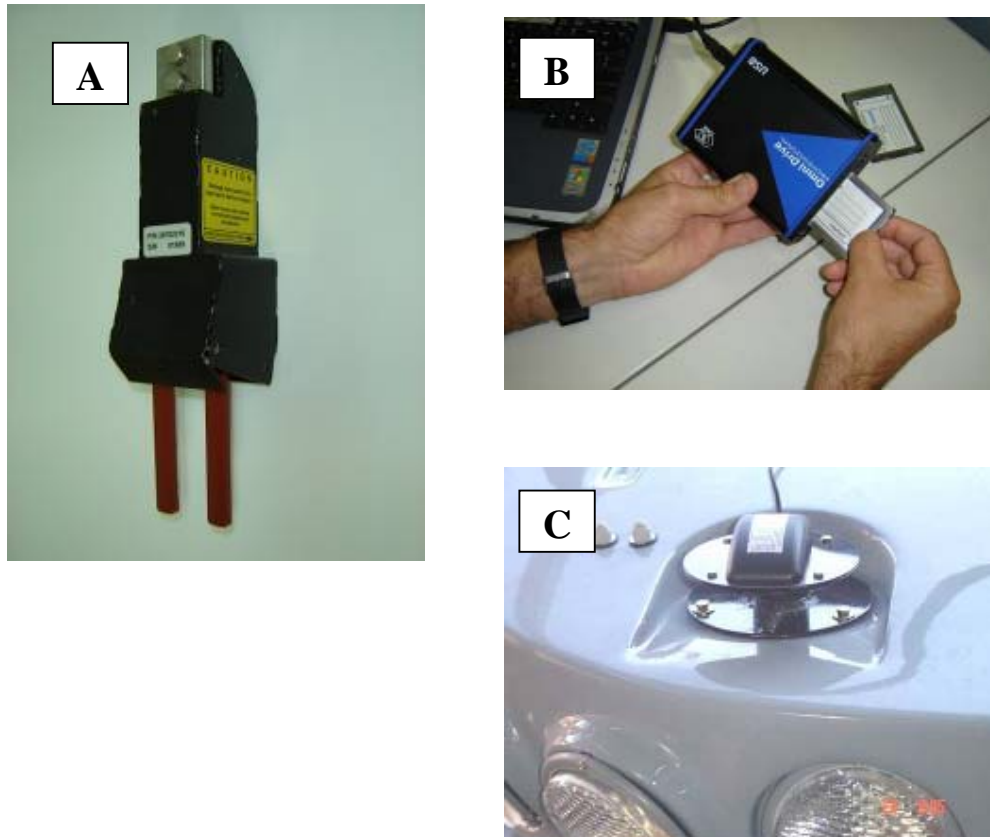
A tecnologia embarcada nessas colhedoras permite que o usuário registre e armazene, em um determinado intervalo de tempo, a posição (latitude, longitude e altitude) da máquina no campo, e a quantidade relativa de produção por unidade de área. Além dessa ferramenta, utilizada nesse trabalho, é possível também mapear problemas básicos de manejo como a presença de plantas daninhas, falhas na semeadura, ocorrência de erosão, manchas com umidade, entre outras aplicabilidades. Isso proporciona uma minimização nos custos e investimentos na solução de problemas básicos de manejo.



**Figura 3** – Colhedora utilizada para a colheita georreferenciada e detalhe da cultura da soja na safra 2002/03 – Palmeira das Missões, RS.

A colhedora utilizada nos trabalhos não estava equipada com sensor de umidade do grão. A forma de correção da umidade encontrada pelo produtor, Administrador M.Sc. Luciano Sulzbach para realizar esta correção foi utilizando alguns recursos que o sistema proporciona ao produtor. Neste caso, o produtor optou por tratar cada carga de caminhão (equivalente a duas de um tanque de grãos) como um trabalho individual. Assim a cada duas descargas do tanque graneleiro o sistema era aferido com base no peso limpo e seco de modo

que ao final da jornada de trabalho era possível corrigir as distorções de umidade e de impurezas obtendo assim os mapas de produtividade com grau de confiabilidade elevado porque havia uma conferência entre o peso do produto registrado na cooperativa e o estimado pelo Sistema Fieldstar.



**Figura 4** – Detalhe do sensor de rendimento Micro Track (A), leitora com cartão de dados PCMCIA (B) para o armazenamento de dados e antena receptora GPS (C) - componentes envolvidos na tecnologia embarcada da colheitadeira utilizada para a obtenção dos dados de produtividade.

Inicialmente, os dados de produtividade de cada colheita, foram submetidos a uma análise estatística exploratória com o objetivo de verificar a amplitude da variabilidade horizontal da produtividade existente na área. Em um passo seguinte, foram realizadas correlações entre os seis conjuntos de dados de produtividade através da matriz de correlação de Pearson, para verificar o comportamento da variabilidade temporal da área em estudo.

Para verificar a estrutura da dependência espacial optou-se pela construção dos semivariogramas experimentais para cada conjunto de dados de produtividade utilizando-se o

programa Geovisual (Yamamoto, 2002). Para a análise da correlação ou dependência espacial entre os valores de produtividade de diferentes anos, utilizou-se o semivariograma cruzado, conforme descrito por Goovaerts, (1999). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado segundo Cambardella et al. (1994). As análises geoestatísticas contaram com o apoio do pesquisador João Viana (Embrapa – Sete Lagoas – MG).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os seis conjuntos de dados de produtividade foram, em um primeiro momento, avaliados por parâmetros estatísticos que são apresentados na Tabela 2. Para a cultura da soja, a maior produtividade média foi expressa na safra 2003 (Tabela2), justificada pela boa disponibilidade hídrica ocorrida durante o ciclo da cultura (Figura 5). As culturas da soja 2004 e milho 2005 enfrentaram problemas de déficit hídrico, fato que resultou em elevação dos coeficientes de variação nas duas safras, respectivamente (Tabela 2).

Os dados de produtividade das seis safras mostram a variabilidade espacial e temporal da produtividade. Isso pode ser comprovado analisando os dados contidos na Tabela 2, onde são observados elevados coeficientes de variação no conjunto de dados. Avaliando as produtividades médias para a cultura da soja, verifica-se ligeiro incremento de produtividade do primeiro para o segundo cultivo e uma queda de 30% quando considerado o terceiro cultivo na safra de 2004. Esta queda também é verificada no segundo cultivo de milho onde na safra de 2005 a redução foi de 25% em relação à safra de 2002. Estes dois fatos podem ser atribuídos às estiagens que ocorreram nas safras referidas conforme demonstrado nos pluviogramas do período em estudo, construído com dados obtidos nos registros históricos da Granja São Bento (Figura 5). Nestes dados pode-se avaliar a severidade da estiagem nos anos mencionados, os quais apresentaram precipitações, nos meses de fevereiro e março, abaixo da média. Tomando-se como parâmetro a produtividade de soja de 2003, que foi um ano com precipitações normais, e calculando o rendimento relativo dos demais cultivos observa-se que as médias de 2001 e 2004 foram 96% e 67% respectivamente. Estes valores dados mostram uma certa homogeneidade dos dados de produtividade dos anos 2001 e 2003, e uma queda acentuada de 33% no ano de 2004 em decorrência do déficit hídrico apresentado naquele ano. Aplicando este mesmo raciocínio para a cultura do milho, observa-se que em 2005 houve uma redução de 24% quando comparado à média do cultivo obtido em 2002, a qual também pode ser atribuída ao déficit hídrico ocorrido naquele ano. Esta avaliação, baseada nas médias, são

de grande importância para avaliar a interferência de períodos de déficit hídrico apresentaram nos cultivos, porém permitem pouca inferência com relação ao comportamento da variabilidade temporal da produtividade desta área. Neste sentido, buscando maior entendimento da variabilidade apresentada nos diferentes dados de produtividade, buscou-se avaliar o comportamento estatístico dos dados analisando a evolução da produtividade nos quartis superior e inferior em cada cultivo (Tabela 2). Para a cultura da soja, tomando novamente a safra 2003 como parâmetro, obteve-se comportamento semelhante ao obtido para as médias, onde, as safras 2001 e 2004 apresentaram decréscimos de 6 e 28% respectivamente no quartil superior, considerando o rendimento relativo do ano de 2003. Em contrapartida para o quartil inferior, os decréscimos foram de 1 e 38% respectivamente para os anos 2001 e 2004. Para a cultura do milho os decréscimos foram de 25 e 27% para o quartil superior e inferior respectivamente. Valiosas são estas informações que demonstram comportamento diferente para os dados posicionados acima e abaixo da média. Este fato é mais relevante na cultura da soja na safra de 2004, onde no quartil inferior a redução foi 10% maior que a variação apresentada no quartil superior. Este fato sugere que as zonas de baixo potencial produtivo, ao longo dos anos, estão expressando de uma forma mais clara suas limitações quando em situação de estresse. Tal comportamento era esperado, em maiores proporções para o milho, em decorrência desta cultura ser mais exigente em qualidade do solo. A hipótese para tal comportamento pode ser atribuída ao comportamento vulnerável apresentado pela cultura da soja, que em anos normais de precipitação apresenta desenvolvimento mais homogêneo em toda área, discriminando de forma amena as zonas com diferentes potenciais produtivos, e em anos com restrições hídricas a diferença entre as zonas passa a ser mais expressiva. Isso pode ser comprovado nos valores do quartil inferior da cultura da soja nos anos 2003 e 2004 onde os valores foram de 2928 e 1835 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Já a cultura do milho por apresentar maiores exigências aos fatores de produção independente do déficit hídrico demonstra comportamento similar nas variações dos quartis superior e inferior entre os anos. Outra hipótese que deve ser considerada é a influência apresentada pela adubação nitrogenada na cultura do milho, a qual, na Granja São Bento, é aplicada em doses objetivando os maiores rendimentos. Isso pode mascarar outras deficiências que por ventura estejam presentes na área especialmente aquelas associadas à matéria orgânica (MO) como o nitrogênio. Já a cultura da soja que 25% do nitrogênio absorvido é retirado do solo, apresenta maior vulnerabilidade às limitações de solo, como locais de menor conteúdo de matéria orgânica, por exemplo, verificado nas zonas de baixo potencial produtivo.

Quanto ao coeficiente de variação, houve um aumento ao longo dos anos (Tabela 2), sendo os maiores valores encontrados nos anos que apresentaram estiagem no período de cultivo. Este fato pode estar atrelado às características físicas da área em estudo.

Amado et al. (2005), estudando alguns atributos físicos do solo, nesta mesma área, encontraram limitações como compactação do solo e baixa infiltração de água em regiões da área que, ao longo dos anos, tem apresentado baixas produtividades. Em contrapartida, neste mesmo estudo, verificaram que nos locais onde as produtividades se mantiveram altas ao longo dos anos a matéria orgânica e as características físicas do solo também apresentaram melhor desempenho. Isso conduz a suposição que em anos que apresentam déficit hídrico na estação de cultivo, como ocorrido nas safras de verão 2003/04 e 2004/05, as características físicas estão apresentando influência significativa no potencial produtivo da área em estudo.



**Tabela 2** – Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade, em seis safras – Palmeira das Missões/RS.

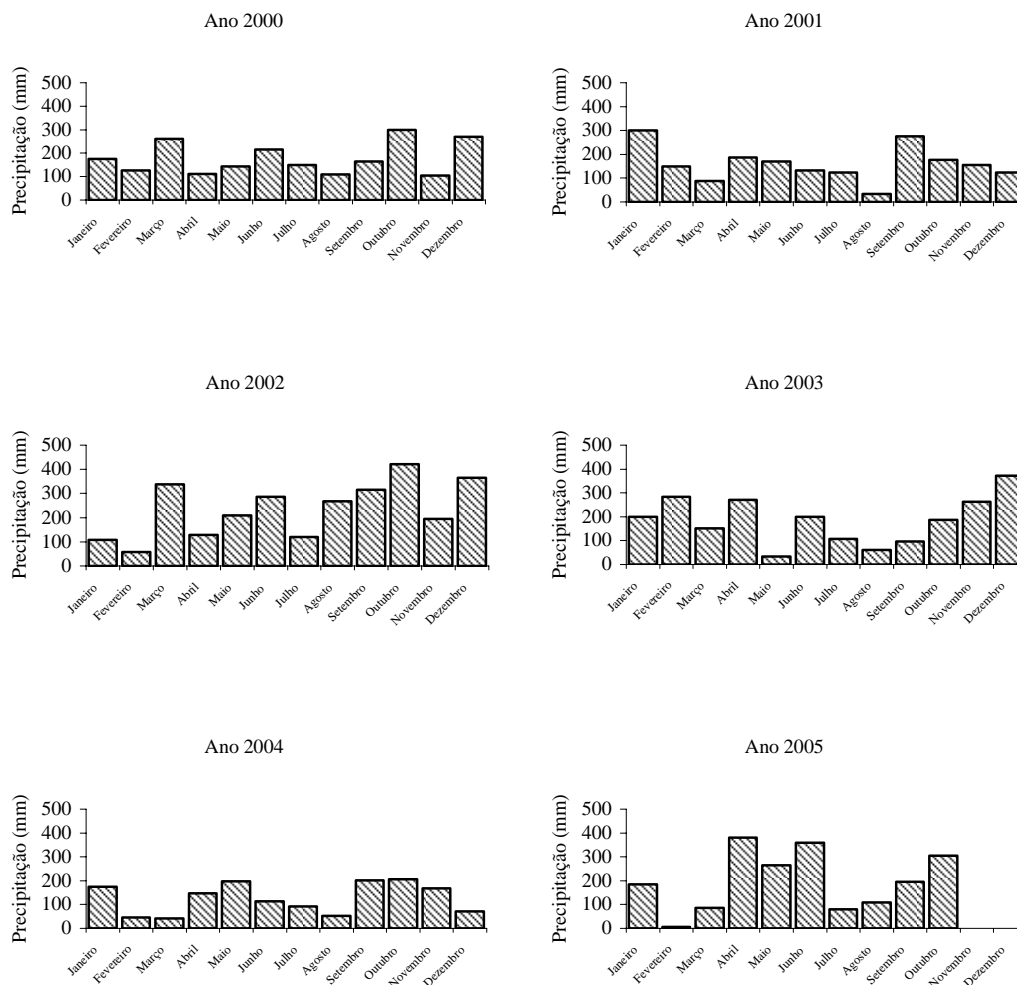
Variáveis	Soja 2001	Milho 2002	Soja 2003	Trigo 2003	Soja 2004	Milho 2005
Média (kg)	3186	7845	3314	3512	2238	5990
Desvio Padrão (kg)	412	1444	600	561	540	1637
Coefficiente de Variação*	12	18	18	16	24	27
Máximo (kg)	4453	12397	5897	5116	3688	15643
Quartil Superior (kg)	3463	8940	3632	3925	2643	6732
Mediana (kg)	3209	7984	3281	3586	2210	5838
Quartil Inferior (kg)	2904	6804	2927	3160	1835	5005
Mínimo (kg)	2034	3331	1801	1428	764	1701
Número de dados	2514	2481	2357	2492	2317	2505

\* Em percentagem

**Tabela 3** – Coeficientes de correlação entre os dados de produtividade nas seis safras - Palmeira das Missões/RS.

	Soja 2001	Milho 2002	Soja 2003	Trigo 2003	Soja 2004	Milho 2005
Soja 2001	1.00					
Milho 2002	0.29**	1.00				
Soja 2003	0.17**	0.25**	1.00			
Trigo 2003	0.33**	0.50**	0.28**	1.00		
Soja 2004	0.40**	0.49**	0.25**	0.56**	1.00	
Milho 2005	0.12**	0.34**	0.05**	0.14**	0.25**	1.00

\*\* Significância a 1%.



**Figura 5** - Precipitações ocorridas durante os seis anos de avaliação – Palmeira das Missões, RS.

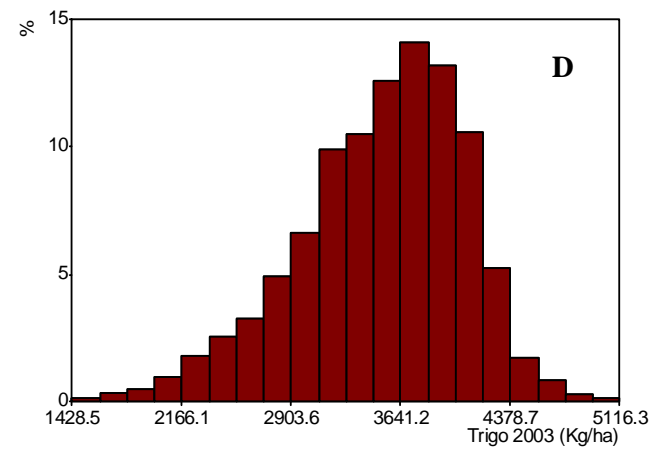
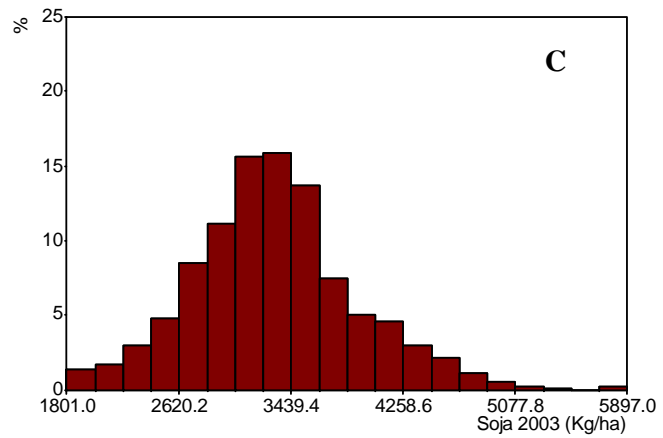
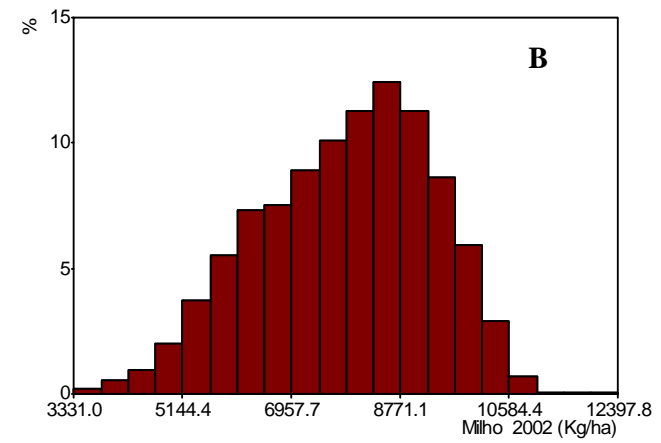
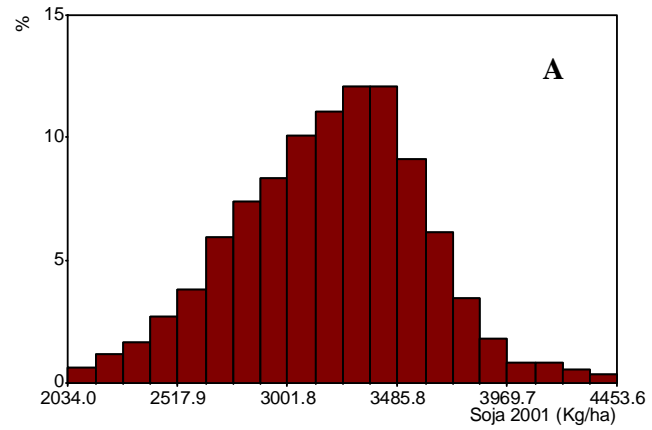
Os resultados obtidos com as correlações entre as produtividades das culturas são apresentados na Tabela 3. Analisando estes dados encontramos valores significativos de correlação entre as diferentes culturas avaliadas, com exceção do último cultivo de milho o qual apresentou correlações baixas como no caso da correlação com a cultura da soja 2003. Tenha-se a presença destas correlações que se mostraram atípicas ao conjunto de dados, a tendência de altas correlações demonstra que a área apresenta alta variabilidade, porém, esta tem comportamento estruturado ao longo dos anos. A alta variabilidade constatada pode ser o produto da variabilidade espacial de atributos do solo e da instabilidade climática ao longo dos anos tão comum no RS. O coeficiente de correlação entre os mapas de rendimento de soja variou de 0,17 a 0,40. Já na correlação entre os mapas de rendimento de milho foi de 0,34.

Como na área utiliza-se rotação de culturas avaliou-se também as correlações entre culturas. Os resultados observados indicaram correlações de 0,50, para ano normal, e 0,14, para ano com déficit hídrico no milho, entre trigo e milho 2002 e 2005 respectivamente (Figura 6). Portanto, neste caso o efeito do déficit hídrico diminuiu a correlação entre os dados dos diferentes anos. O trigo quando confrontado com a soja obteve-se valores de correlação de 0,33; 0,28 e 0,56 para os anos 2001, 2003 e 2004 respectivamente (Figura 7). Para o caso da soja a deficiência hídrica verificada em 2004 aumentou a correlação entre os dados de rendimento. Observa-se aí um fato interessante onde a maior correlação entre as gramíneas ocorreu em um ano sem adversidades climáticas. Já para a correlação com o soja, o maior valor ocorreu em um ano com déficit hídrico. Em contrapartida, os dois maiores valores de correlação, no conjunto de dados de rendimento, estão vinculados à cultura do trigo, logo dados de outro cultivo de trigo seriam interessantes para confirmar esta tendência. Outro fato a ser considerado é obtido ao avaliar as correlações envolvendo a cultura da soja em 2004 a qual apresentou correlações de 0,40; 0,49; 0,25; 0,56 e 0,25 com soja 2001, milho 2002, soja 2003, trigo 2004 e milho 2005 respectivamente. Neste grupo temos duas correlações mais altas (0,49 e 0,56) cada qual com culturas distintas.

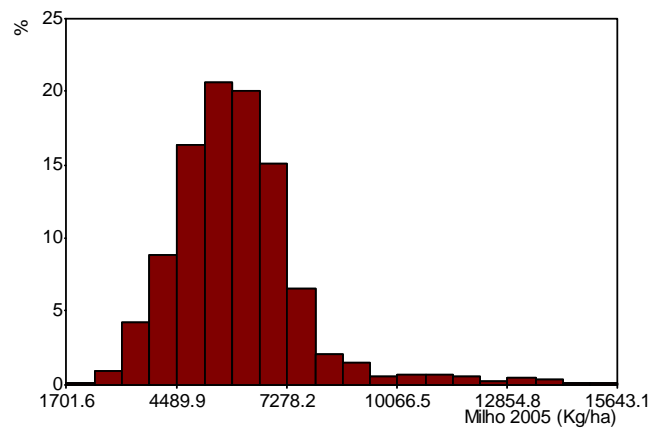
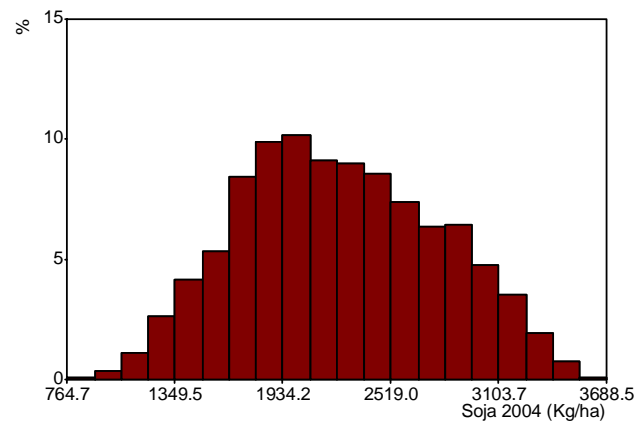
Uma avaliação importante pode ser feita observando a cultura da soja em 2003, safra em que foi verificado o melhor desempenho desta cultura entre os dados avaliados. Avaliando as correlações apresentadas por ela, tem uma predominância de baixos valores (0,17; 0,25; 0,28; 0,25 e 0,05 para Soja 2001, milho 2002, trigo 2003, soja 2004 e milho 2005 respectivamente). Este comportamento pode ser considerado mais um indicio que a cultura da soja apresenta desempenho homogêneo em anos normais de precipitação com desenvolvimento similar em toda área, discriminando de forma amena as deficiências da área. Este fato confirma que a soja é mais rústica do que o milho e menos sensível a qualidade do solo quando em condições hídricas normais. Somente em situação de estresse hídrico é que ela aumenta a sensibilidade para diferenças de qualidade do solo.

Os menores coeficientes de correlação entre os dados foram obtidos entre milho 2005 (ano seco) e soja 2003 e 2001 (anos normais). Tal fato está em parte associado que nas regiões mais baixas da área nos anos de elevada precipitação verifica-se acamamento de soja e mesmo problemas de drenagem. Já no ano seco nesta área mais baixa é onde se obtém os maiores rendimentos de milho justificando a baixa correlação entre os dados.

Os histogramas de distribuição de frequência dos dados de produtividade demonstram uma tendência de normalidade nos dados analisados (Figuras 6 e 7).



**Figura 6** - Histograma de distribuição da frequência para produtividade da cultura da soja na safra 2001 (A), milho na safra 2002 (B), soja na safra 2003 (C) e da cultura do trigo na safra 2003 (D) – Palmeira das Missões, RS.



**Figura 7** - Histograma de distribuição da frequência para produtividade da cultura da soja na safra 2004 e do milho na safra 2005 - Palmeira das Missões, RS.

A análise de tendências temporais em mapas de produtividade consecutivos deve sempre estar amparada em questões climáticas e a flutuações de outros fatores como químicos e físicos do solo. Blackmore et al. (2003) analisando, na Inglaterra, mapas de colheita de seis anos consecutivos observaram inexistência de tendências nas áreas de estudo sugerindo possíveis compensações em função de fatores climáticos.

Considerando os anos com precipitações normais (2000, 2001, 2002 e 2003) nota-se que a área em estudo, apresenta variabilidade temporal estruturada, onde as diferentes produtividades se repetem ao longo dos anos. Esse tipo de constatação é de extrema importância, pois consolida a identificação dos fatores que limitam a produtividade e proporciona estabelecer práticas de manejo consistentes para a correção dos problemas e elevação da expressão do potencial produtivo das culturas.

Em que pese isso, Viana (2005) apontou para os cuidados quando da correlação de atributos como a produtividade, pois esta representa uma média local relativa à área colhida pela máquina (função de sua velocidade pela largura da plataforma de colheita). Isso faz com que cada ponto amostrado de produtividade represente uma área de 15 a 20 m<sup>2</sup>. Assim, as escalas de amostragem podem diluir certos efeitos de tendências, principalmente quando da comprovação de problemas climáticos no período de avaliação.

A colhedoura utilizada nas operações de colheita não estava equipada com sensor de umidade para correção automática dos dados, podendo superestimar os resultados obtidos no início do período de colheita, quando os grãos estão mais úmidos, ou em posições de maior umidade no campo (Reitz & Kutzbach, 1996). Esse tipo de consideração é importante, no entanto não deve ser considerado um entrave tecnológico quando se pensa em buscar novos subsídios de gerenciamento e conhecimento da variabilidade. Princípios agrônômicos como o manejo de pragas, doenças, estado de plantas, e as demais avaliações dessa magnitude, antecedendo a colheita, compreendem a base para qualquer interpretação do que se fazer a partir do conhecimento da expressão do potencial produtivo. É relevante ressaltar a importância que um mapa de produtividade possui no planejamento de atividades agrícolas em uma propriedade rural. Segundo Willis et al. (1999), quando os produtores observam mapas de produtividade, eles estão olhando para padrões e tendências gerais, tais como áreas de produtividade extraordinariamente alta ou baixa. Uma vez que estas áreas forem identificadas, consideram os autores que seria então tarefa do produtor, o qual é mais familiarizado com os solos e a história do campo, tentar deduzir por que estas variações estão ocorrendo. Acrescentam ainda que, se o conhecimento das características dos solos e do histórico da área permitirem ao agricultor lançar a hipótese de um fator que esteja limitando a produtividade, algumas ações poderiam então ser tomadas para manejar as áreas de baixa produtividade de modo diferenciado, a fim de obter um melhor rendimento destas áreas.

Outra utilização dos mapas de produtividade ainda pouco explorada é a sua utilização para determinar o potencial produtivo de diferentes áreas. Lütticken 1999 suscita a questão de quantos anos de dados são requeridos, sem que haja ainda uma resposta definitiva para ela.

Em seu estudo, Lütticken (1999) afirmou que os resultados sugerem 2 a 3 anos de mapeamento de produtividade para que informações relevantes possam ser obtidas. Este mesmo autor analisou temporalmente dados de produtividade, a partir de uma única rotação de cultura fornece, principalmente, informação qualitativa sobre diferenças relativas no interior de um campo, ao passo que dados de pelo menos duas rotações de cultura podem ser considerados como uma base de dados confiável, também para quantificar o potencial de produtividade localizada de diferentes culturas e até variedades. No Brasil, ainda são escassas as áreas que possuem um conjunto de mapas de rendimento que permitam análise temporal.

Ainda relacionado aos possíveis benefícios de se obter através de mapas de produtividade pode-se citar, por exemplo, as informações georeferenciadas de produtividades permitem realizar planos de fertilização baseados em dados de nutrientes exportados, mudando-se assim a base para a tomada de decisões no tocante as práticas de fertilização dos campos em produção. Isto é válido especialmente para aquelas áreas onde os níveis de nutrientes já estão elevados e deseja-se manter estes níveis. Neste caso, o mapa de colheita e posteriormente de exportação de nutrientes no grão são uma ferramenta importante. No entanto, utilizando informações paralelas como dados do status de fertilidade do solo e da planta, acredita-se ser possível realizar tais planejamentos baseados em um menor período de amostragem.

O estudo da variabilidade espacial (Tabela 4) revelou que os dados de produtividade expressaram uma dependência espacial abrangendo uma faixa de correlação com distâncias que variaram de 154 a 798 metros.

Também na Tabela 4 são apresentados os valores de dependência espacial dos seis conjuntos de dados os quais foram calculados através da % de semivariância do efeito pepita. Nele obteve-se uma informação importante que demonstra que as gramíneas apresentaram dependência espacial considerada forte, enquanto para todos os cultivos de soja avaliados a dependência espacial encontrada foi moderada. Este comportamento encontrado para o cultivo de milho corrobora com os dados encontrados por Rodrigues (2002) analisando dados de produtividade desta cultura.

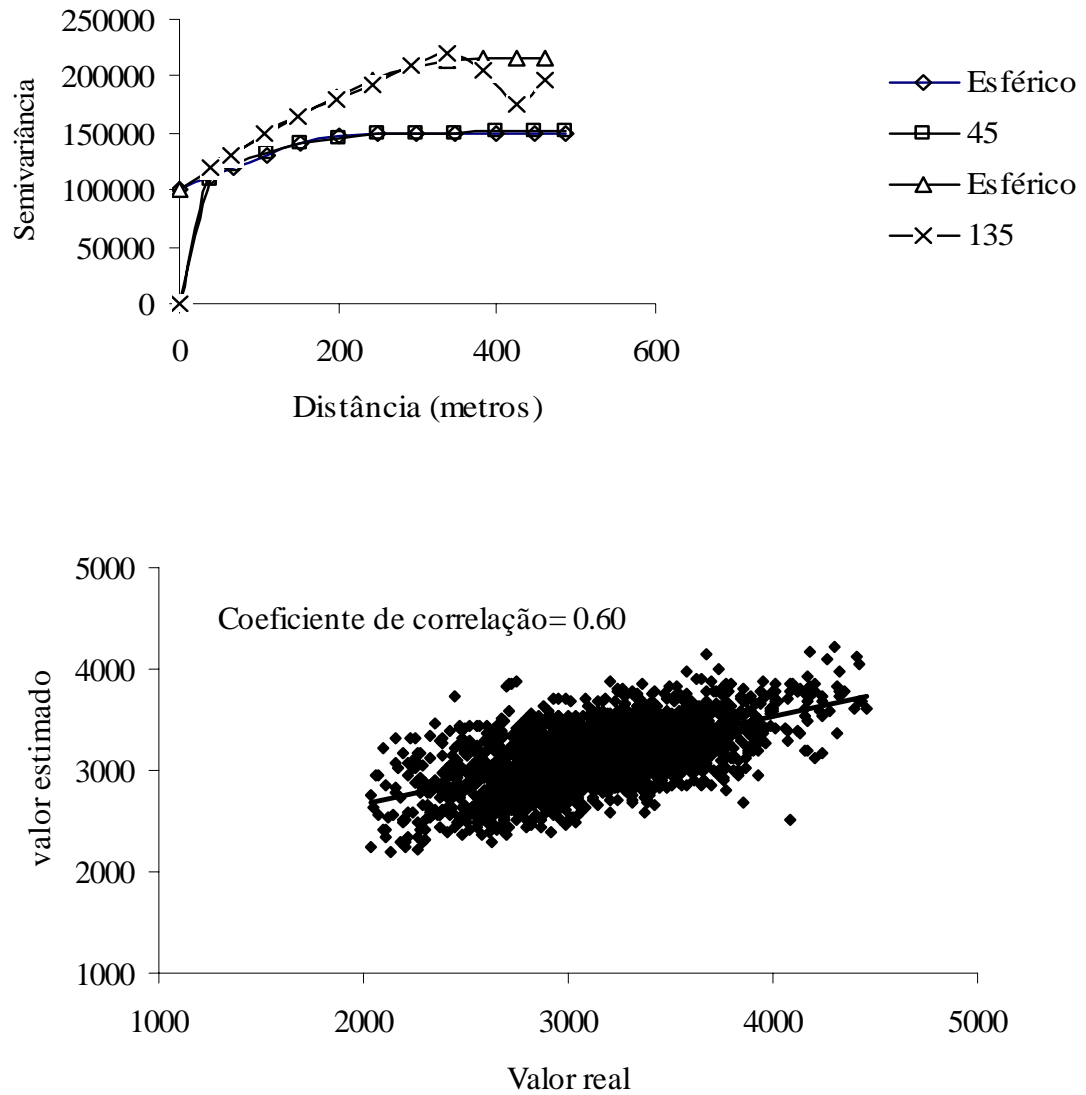
**Tabela 4** – Parâmetros geoestatísticos dos seis conjuntos de dados de produtividade considerados no estudo – Palmeira das Missões/RS.

<b>Cultura</b>	<b>Modelo</b>	<b>Direção</b>	<b>Alcance (a)</b>	<b>Dependência espacial</b>	
		<b>Graus</b>	<b>Metros</b>	<b>IDE</b>	<b>Intervalos</b>
<b>Soja 2004</b>	Esférico	45	220	68	Moderada
	Esférico	135	400	45	Moderada
<b>Soja 2003</b>	Exponencial	0	470	54	Moderada
	Esférico	90	250	54	Moderada
<b>Soja 2001</b>	Esférico	45	250	67	Moderada
	Esférico	135	376	47	Moderada
<b>Trigo 2003</b>	Exponencial	30	798	16	Forte
	Exponencial	120	376	47	Moderada
<b>Milho 2005</b>	Exponencial	0	154	5	Forte
	Exponencial	90	154	5	Forte
<b>Milho 2002</b>	Exponencial	0	484	22	Forte
	Exponencial	90	484	22	Forte

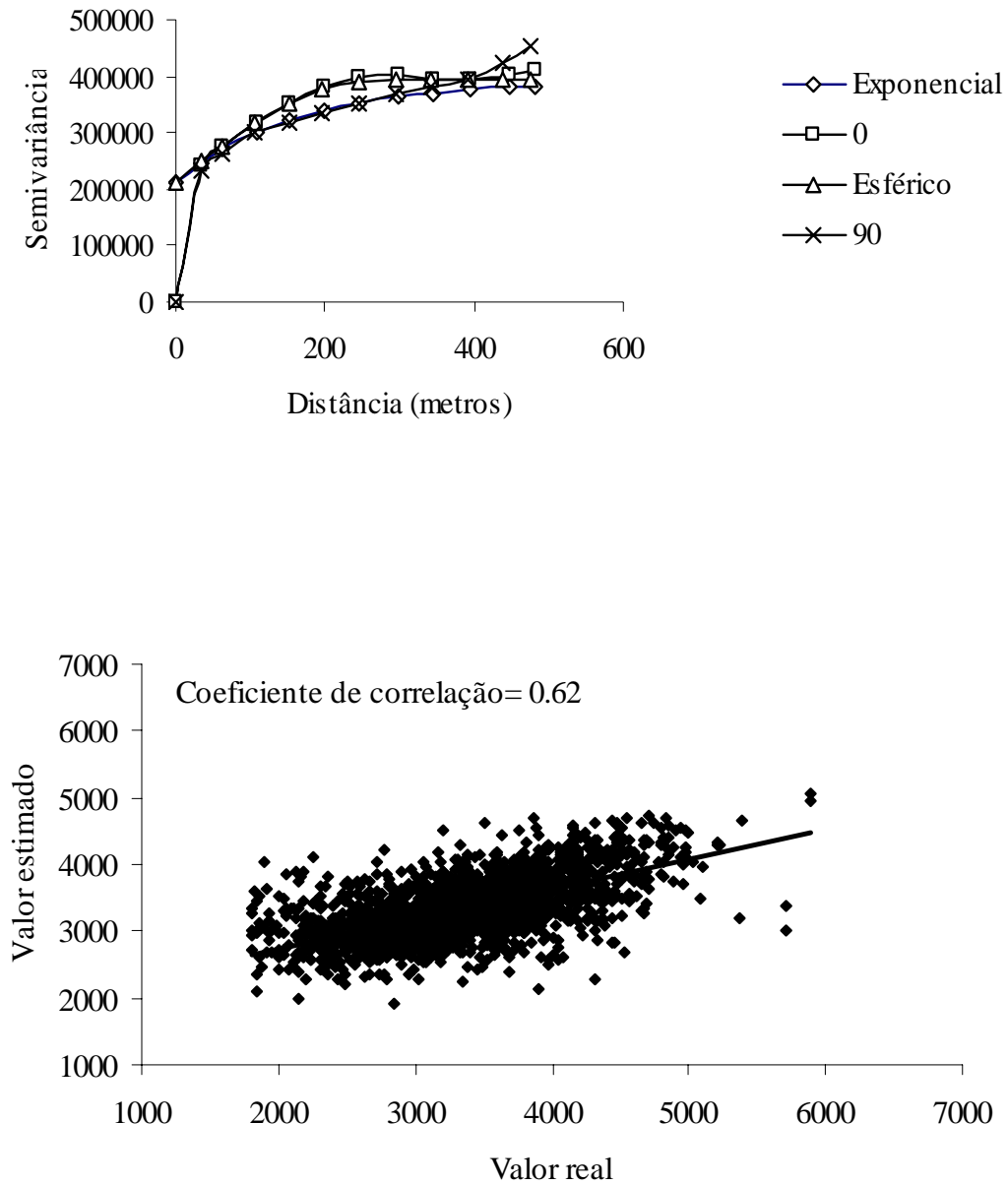
Analisando os semivariogramas e os gráficos de validação cruzada para a cultura da soja (Figura 9, 10 e 11) observa-se inconsistência nos dados. Nos dois primeiros anos de cultivo os dados ofereceram menores coeficientes de correlação aos modelos de forma que apresentaram moderada confiabilidade (Figuras 8 e 9). Já no terceiro cultivo desta cultura em 2004 obteve-se um bom ajuste dos dados ao modelo, de forma que obteve-se coeficiente de correlação, na validação cruzada, de 0,88 (Figura 10). Deste modo, alguma inferência sobre a inconsistência dos dados observados nos anos 2001 e 2003 deve-se considerar todos os fatores de produção, uma vez que a forma de coleta de dados não sofreu alteração entre os cultivos. Para a cultura do trigo também foi encontrado correlação moderada entre os valores reais e estimados com coeficiente de correlação de 0,75 (Figura 11). Assim como o exposto para os dois primeiros cultivos de soja, os dados de produtividade de trigo devem ser utilizados com cautela, necessitando, talvez, mais um conjunto de dados destas culturas para que se tenha o perfil da área para esta cultura.

Obteve-se nos dados de milho (Figura 12 e 13) diferença quanto ao exposto para soja e trigo. Pode-se observar a consistência do ajuste obtido dos dados ao modelo, o que resultou em altos índices de correlação para validação cruzada, conferindo assim alta confiabilidade nos dados.

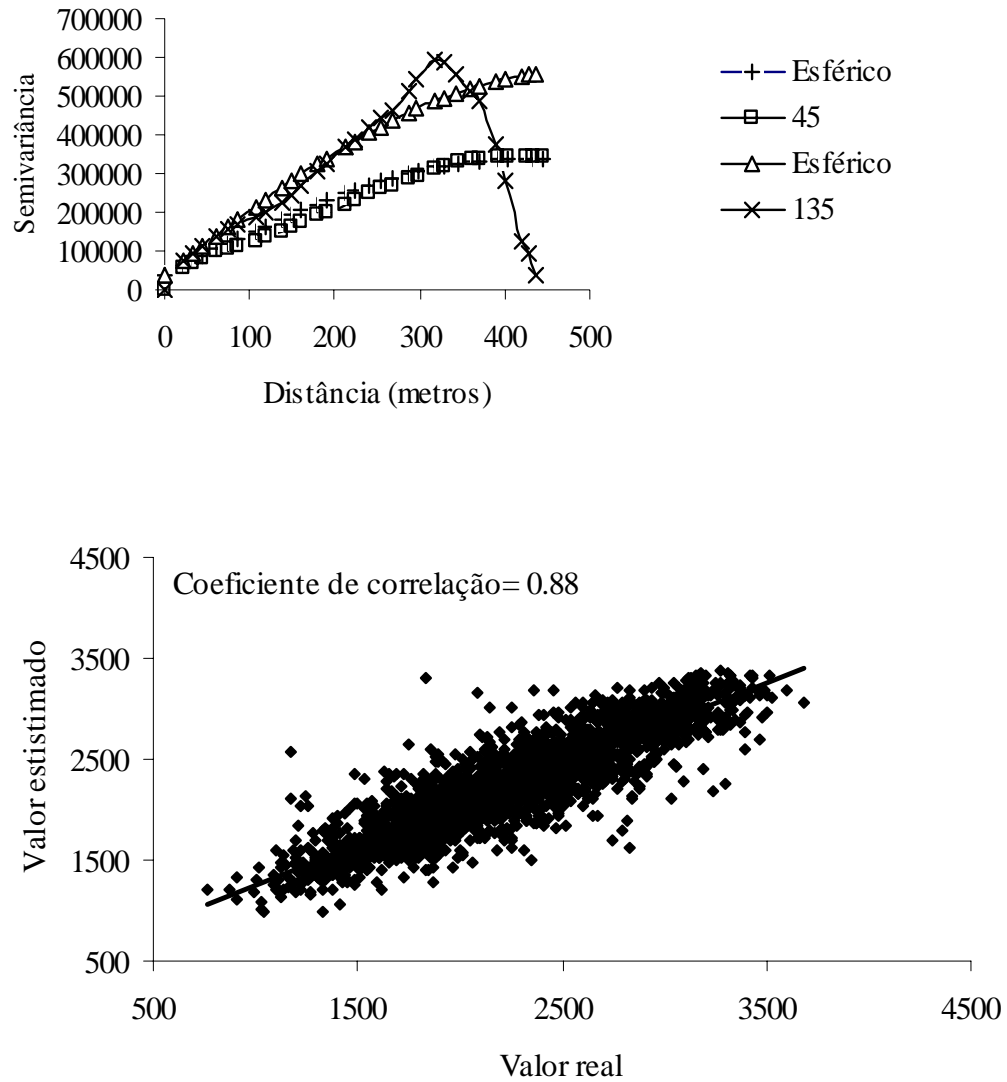




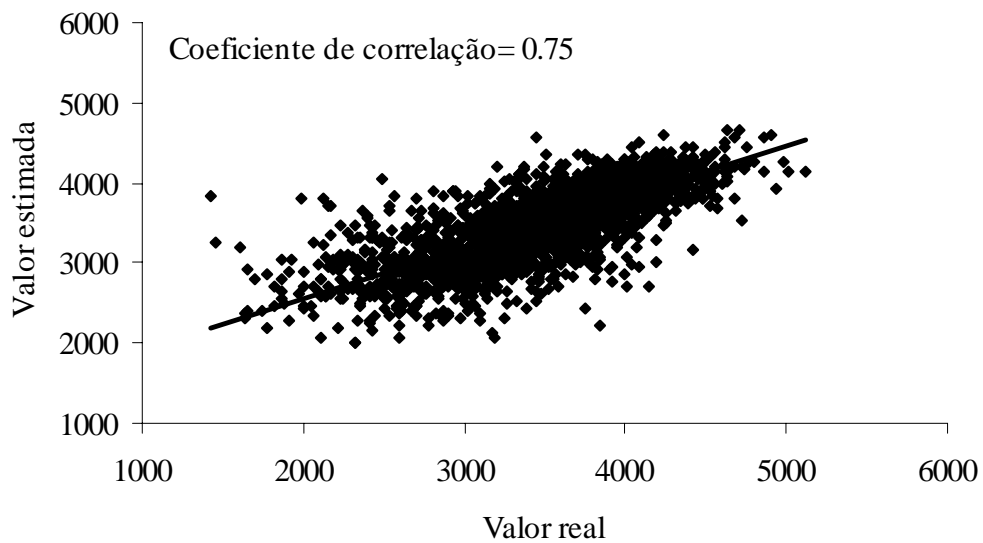
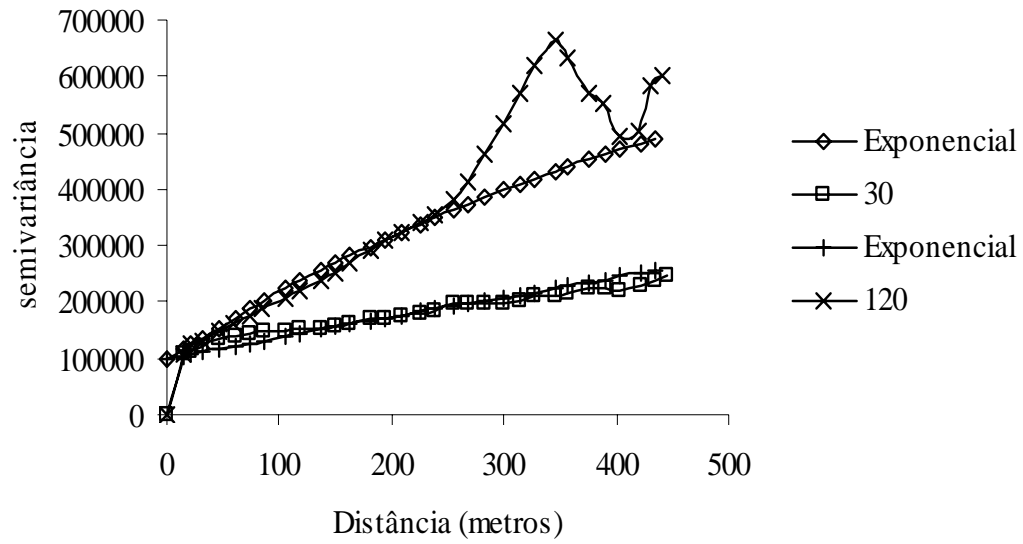
**Figura 8** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de soja 2001 (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões – RS.



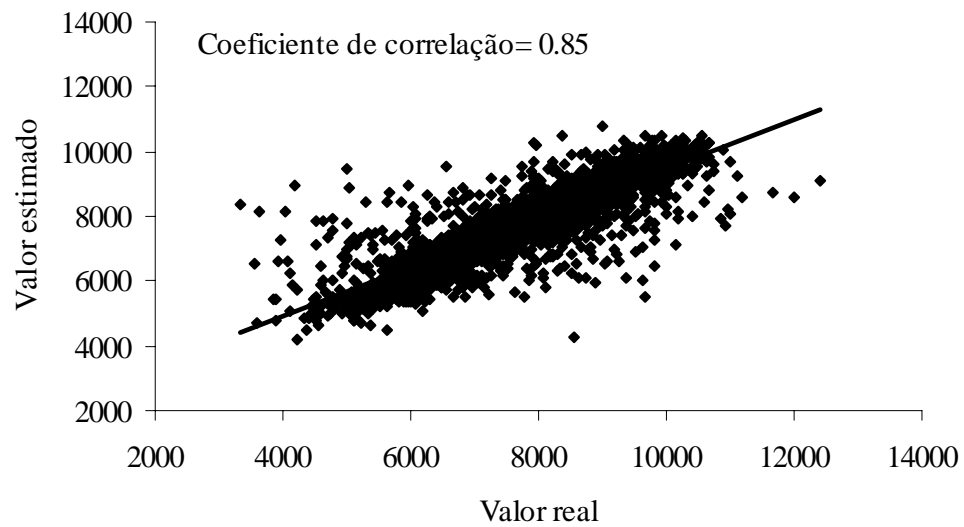
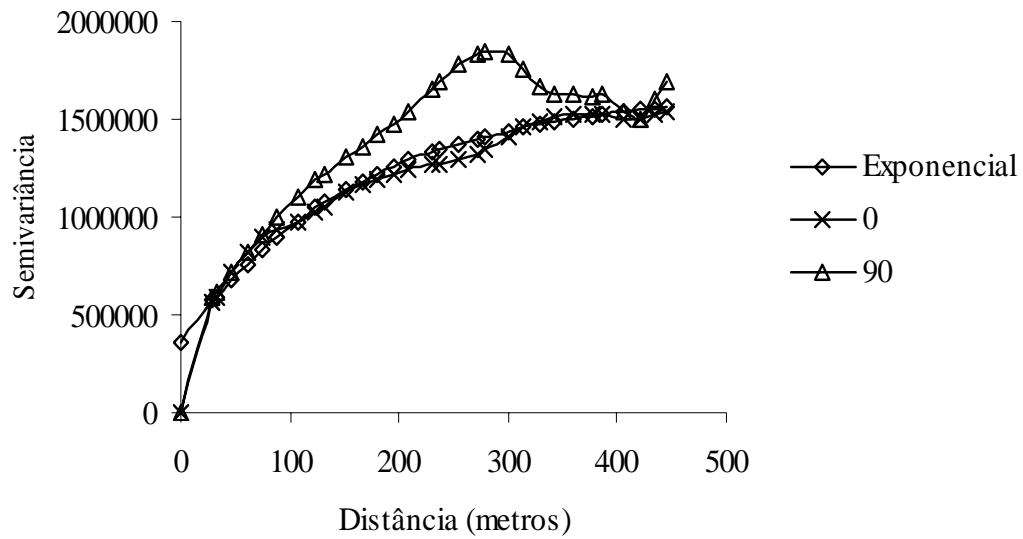
**Figura 9** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de soja 2003 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS.



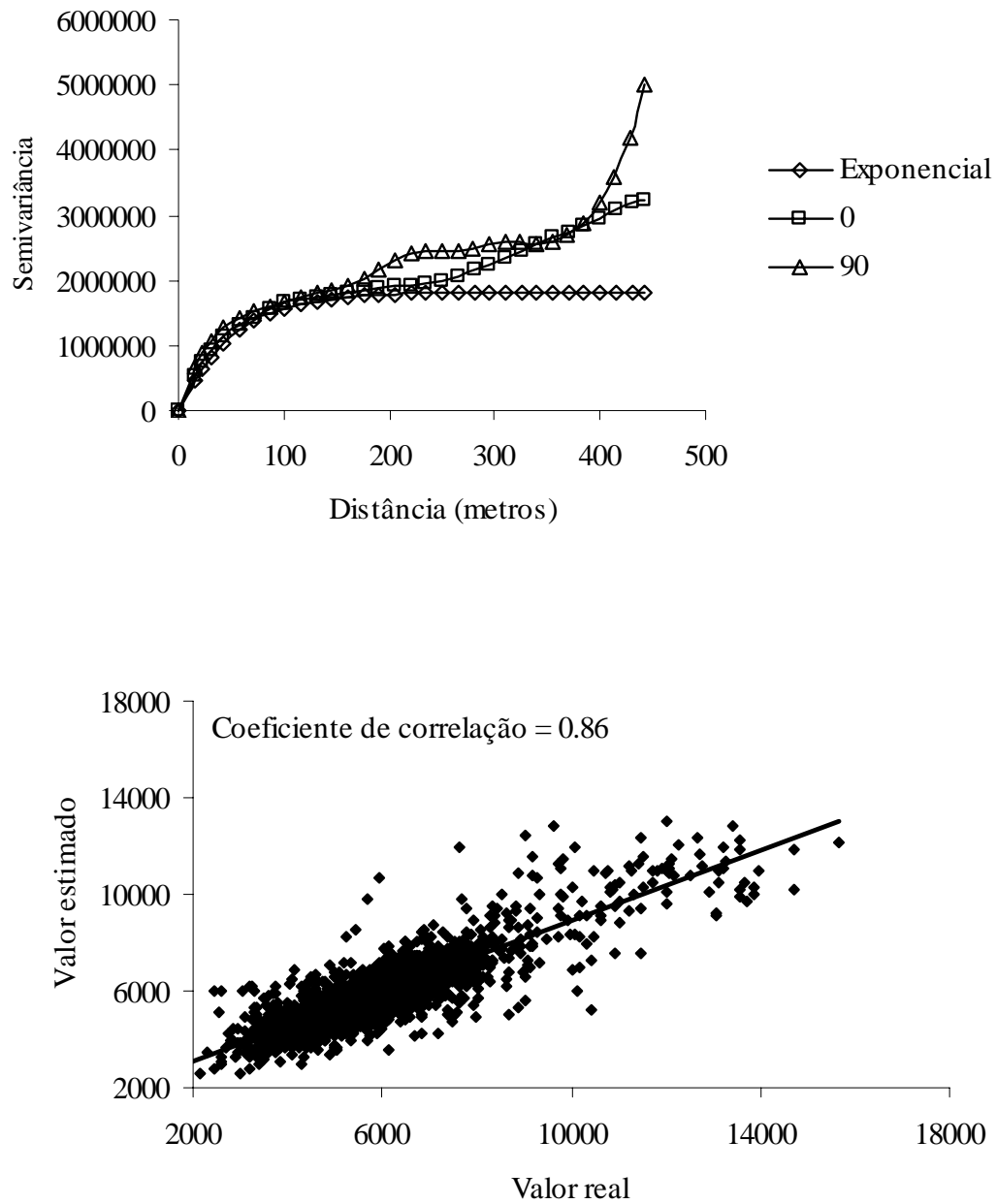
**Figura 10** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de soja 2004 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS.



**Figura 11** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de trigo 2003 (comportamento anisotrópico) - Palmeira das Missões – RS.



**Figura 12** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de milho 2002 (comportamento isotrópico) - Palmeira das Missões – RS.



**Figura 13** – Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da produtividade de milho 2005 (comportamento isotrópico) - Palmeira das Missões – RS.

A maior confiabilidade nos dados de produtividade da cultura do milho pode estar atrelada a aspectos práticos relacionados à coleta de dados a campo. Para o sistema de mapeamento utilizado neste trabalho, fatores como a largura de plataforma e a limpeza do sensor de rendimento são de fundamental importância para se obter dados confiáveis. Neste sentido, a cultura do milho apresenta algumas vantagens em relação às demais, pois com relação a largura útil real de plataforma durante a colheita, como temos a colheita em linha, o uso de plataforma espigadeira permite ao operador o controle exato da área que está sendo colhida. Em contrapartida quando se está realizando a colheita com plataforma segadora (para culturas como soja e trigo), o controle da largura efetiva de corte é dependente da habilidade e agilidade do operador, podendo embutir erros na coleta de dados.

Quanto ao sensor de rendimento, apresentado na Figura 4 A , quando em colheita de grãos oleaginosos (soja), a possibilidade de acúmulo de impurezas junto às hastes, que ficam em contato com os grãos, é maior, necessitando maior atenção por parte do operador, uma vez que o acúmulo de material resulta na coleta de dados irreais de produtividade. Este fato não ocorre na cultura do milho, pois este possui o grão considerado auto limpante.

## CONCLUSÕES

- Os resultados de rendimento obtidos indicam que a área estudada apresenta variabilidade espacial considerada alta, sendo os maiores valores observados em anos com presença de déficit hídrico durante o período de cultivo.
- As zonas de baixo potencial produtivo, expressas pelo quartil inferior, ao longo dos anos, apresentam os maiores decréscimos na produtividade em anos com déficit hídrico.
- A área apresenta variabilidade temporal com forte estruturação ao longo dos anos.
- A variabilidade da produtividade apresenta dependência espacial consistente abrangendo uma faixa de correlação com distância de 154 a 798 metros.
- A cultura da soja apresentou índice de dependência espacial considerado moderado e restrita capacidade de identificar a variabilidade da qualidade do solo, em anos com precipitações normais.

## RECOMENDAÇÕES

Para os produtores que desejam gerenciar atividades agrícolas com base em dados georeferenciados de rendimento sugere-se, com base neste trabalho, que utilizem os dados da cultura do milho que apresentou índice de dependência espacial considerado forte, indicando sua capacidade na identificação da variabilidade espacial da área. Esta cultura também apresentou alto índice de confiabilidade na validação cruzada dos modelos ajustados apresentando-se como adequada para identificação e quantificação da variabilidade das áreas trabalhadas em agricultura de precisão.



## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi realizado com recursos do Setor de Uso, Manejo e Conservação do Solo e da Água – UFSM, contando com o apoio financeiro do CNPq, Fapergs, Manah e AGCO. Agradecemos a Família Sulzback pela sua acolhida e apoio sempre que necessitada.

## LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A., Reinert, D.J. & Fiorin, J.E.; Variabilidade de solo e planta em podzólico vermelho-amarelo. R. Bras. Ci. Solo, Campinas, 20:151-157,1996.
- AMADO, T.J.C.; Nicoloso, R.; LanzaNova, M.; Santi, A.L.; Lovato,T.; A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto Revista Plantio Direto, edição número 89, setembro/outubro de 2005. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo- RS.
- BALASTREIRE, L.A. Agricultura de Precisão. Piracicaba, 1998. 68 p.
- BERG, M.V.D. & Klant, E.; Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da Variância por amostragem Aninhada. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 21:393 – 399, 1997.
- BLACKMORE, B. S.; GODWIN, R. e FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. Biosystems Engineering, (submitted) 2003.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. *Projeto Radambrasil* - Programa de Integração Nacional - Levantamento de Recursos Naturais. v.31. 1983. 764p.
- CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J., v.58, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M.P., Takeda, E.Y. & Freddi, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 27:695 – 703,2003.
- CONCEIÇÃO, P.C. Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de cultivo. Santa Maria, 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.425-432, 1999.

Dados de Precipitação segundo informação pessoal do proprietário Luciano Sulzbalch.

DAMPNEY, P. M. R., MOORE, M. Precision agriculture in England: Current practice and research-based advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.661-73.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro,RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. – Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 1999.

FRAISSE C. Agricultura de Precisão: tecnologia ao alcance de todos. 2003. Disponível na internet via <http://www.agriculturadeprecisao.com.br> .

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, v.89, p.1-45, 1999.

HAN, S. HUMMEL, J.W. GOERING, C.E. CAHN. M.D. Cel size for site-specific crop management. *Transactions of the ASAE*, v.37, n.1, p.19-26,Jan/Fev. 1994.

LIBARDI, P.L., Mamfron, P.A., Moraes, S.O. & Tuon, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 20:1-12, 1996.

LÜTTICKEN, R. E. Implementation of precision fertilizing concepts on practical farms in Western Germany. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.859-67.

- QUEIROZ, D.M. de DIAS, G.P. MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In. BORÉM, A.B.; GIÚDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.T. Agricultura de Precisão. Viçosa: UFV, 2000.p1-42.
- REITZ, P. e KUTZBACH, H. D. Investigations on a particular yield mapping system for combine harvesters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14: 137-150.1996.
- RODRIGUES, J. B. T. Variabilidade espacial e correlações entre atributos de solo e produtividade na agricultura de precisão. Dissertação de Mestrado, UNESP –Rio de Janeiro – RJ, 2002, 126 p.
- SANTI, A. L., Amado, T. J. C., Pontelli, C.B., Schenato, R.B., Bellé, G.L. , Dellamea, R.B.C., Pés, L. , Pizzuti, L. Indicadores da qualidade e da expressão do potencial produtivo do solo sob sistema plantio direto – dados preliminares. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Recife, 2005.
- SOUZA, Z.M., Silva, M.L.S., Guimarães, D.T.S., Carvalho, M.P., Pereira, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 25:699-707, 2001.
- VEZZANI, F.M. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre, 2001. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- VIANA, J. H. M., Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas. Tese de doutorado. 1966-V614d / João Herbert Moreira Viana. – Viçosa : UFV, 2005. xiii, 194p. : il. ; 29cm.
- WEBSTER, R. Is soil variation random? *Geoderma*, 97: 149-163. 2000.

WILLIS, P. R., CARTER, P. G., JOHANNSEN, C. J. Assessing yield parameters by remote sensing techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.1465-73.

YAMAMOTO, J. K. Guia do Usuário. Sistema Geovisual 2.2 .2002, 82 p.

ZHANG, M., HENDLEY, P., DROST, D., O'NEIL M., USTIN, S. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings.* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.1475-81.

## **CAPÍTULO II**

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA VARIABILIDADE HORIZONTAL  
DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO  
DIRETO**

**RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade horizontal de atributos químicos do solo, em uma área de 57 hectares localizada no município de Palmeira das Missões – RS, onde há cinco anos são realizados estudos de Agricultura de Precisão. Foram coletadas amostras de solo georeferenciadas em maio de 2002 com malha regular de 100 x 100 metros a uma profundidade de 0 a 10 cm. Foram determinados os teores de fósforo (P), potássio (K), matéria orgânica (MO), cálcio (Ca), magnésio (Mg), pH em água (pH), alumínio (Al) e argila. Os dados foram submetidos a análises segundo parâmetros estatísticos e geoestatísticos. Os resultados obtidos indicaram que a área apresenta pouca variabilidade no seu gradiente textural, fertilidade alta com deficiências regionais de fósforo. Os atributos químicos do solo apresentaram dependência espacial classificada como alta e moderada, com alcances variando de 210 a 1277 metros para potássio e argila, respectivamente.

**Palavras chave:** agricultura de precisão, variabilidade espacial, geoestatística, amostragem em grid.

**Characterization of chemical properties of the horizontal variability in a Latossolo Vermelho under a No-till system.**

**ABSTRACT**

The objective of this research was evaluate the horizontal variability of chemical properties in a cropland of 57 ha located in municipality of Palmeira das Missões – RS, where five years are studies of precision agriculture. In May of 2002 was collected soil samples georeferenced in a grid of 100 x 100 m with 0 at 10 cm soil depth. Was determined the levels of phosphorus (P), potassium (K), organic matter (OM), pH water (pH), aluminum (Al) and clay content. The data were evaluated using statistical and geostatistical analysis. The results obtained show that the cropland had low soil texture variability, high soil fertility with located phosphorus deficiency. The chemical properties showed spatial dependence classified as high and moderate, with spatial dependence ranging from 210 to 1277 m to potassium and clay content respectively.

**Key words:** precision farm, variability spacial, geostatistics, grid sampling.



## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a globalização possibilitou o acesso dos produtos nacionais ao mercado internacional, mas expôs o empresário agrícola aos riscos e as constantes oscilações cambiais que elevaram os custos de produção. A exigência dada ao setor primário foi uma maior eficiência na utilização dos insumos e incrementos de produtividade para redução dos custos de produção e manutenção da competitividade. Por outro lado, a filosofia de gerenciamento, com poucas informações, é comum entre os agricultores. Com a mecanização da agricultura e conseqüentemente o aumento das áreas cultivadas, somente foi possível manejar economicamente as culturas em grandes áreas com aplicações uniformes de insumos, utilizando médias.

Tradicionalmente, a agricultura brasileira é realizada baseando-se em médias em todos os seus segmentos (produtividade, preços, teores de nutrientes no solo, etc...). No que se refere à fertilidade dos solos, essa filosofia e prática inicia na amostragem de solo para avaliação da fertilidade. O laudo de análise de solo expressa um único resultado, geralmente, para todo um talhão, desconsiderando a presença da variabilidade espacial e considerando que todas as propriedades do solo são semelhantes dentro da camada amostrada e na sua extensão na área.

Essa forma de buscar o conhecimento, não se sustenta mais quando a estratégia é ampliar o gerenciamento dos meios de produção, a racionalização do uso de insumos e, principalmente a correção das deficiências de fertilidade e a elevação da produtividade. Para a otimização do uso de insumos, sem reduções de produtividades, faz-se necessário o pleno conhecimento e quantificação espacial da variabilidade dos atributos químicos do solo.

Recentemente, com a liberação para uso civil do Sistema de Posicionamento Global (GPS) computadores e programas, foi possível a obtenção, o manejo, o processamento e a análise de grande quantidade de dados, variando no espaço e no tempo (Coelho, 2003). Segundo Molin et al. (2002) a agricultura de precisão preconiza que o manejo das lavouras pode ser melhor conduzido se a variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a ela relacionados forem conhecidos.

A heterogeneidade é uma característica inerente do solo. Numa paisagem natural, o solo apresenta ampla variabilidade dos seus atributos, tanto no sentido espacial como no volumétrico, resultante das interações dos processos que comandam os fatores de sua

formação. O solo agrícola, por sua vez, revela fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico na agricultura. A variabilidade espacial das características dos solos pode ocorrer em diferentes níveis, podendo estar relacionada a fatores como variação do material de origem, clima, relevo, organismos e tempo ou ao efeito de técnicas de manejo dos solos decorrentes do seu uso agrícola.

O solo apresenta heterogeneidade, tanto vertical como horizontal, imposta pela natureza dos fatores responsáveis pela sua formação. Na prática, geralmente, a única heterogeneidade considerada é na direção da profundidade, distinguindo-se as camadas ou horizontes com diferentes propriedades (Reichardt et al., 1986). Segundo os princípios básicos da experimentação, a variabilidade ocorre de forma aleatória, no entanto, vários estudos relatam que a variabilidade das propriedades químicas e físicas do solo apresenta correlação ou dependência espacial (Souza, 1992).

Agricultura de precisão tem como base a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental (Pierce & Nowak, 1997).

Este trabalho teve por objetivo a caracterização e quantificação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, em uma área de lavoura representativa do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, utilizando técnicas e ferramentas da agricultura de precisão.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O presente estudo foi realizado em uma área de lavoura de 57 hectares pertencente à Granja São Bento, localizada no município de Palmeira das Missões, km 15 da BR-468, situada entre as coordenadas 262.752 (E) a 263.962 (E), e 6.918.712 (N) a 6.920.149 (N), numa altitude aproximada de 600 metros (Figura 1). Conforme a EMBRAPA (1999) essa região situa-se na zona da escarpada arenito-basáltica do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 metros e elevados teores de argila.



**Figura 1** – Mapa da localização da base experimental (esquerda), e a vista aérea da propriedade (direita).

Esta área é pioneira no Estado do Rio Grande do Sul no emprego de tecnologias na agricultura envolvendo pesquisas baseadas no gerenciamento através das ferramentas de agricultura de precisão há mais de cinco anos na propriedade. O sistema de manejo empregado é de plantio direto há aproximadamente dez anos, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno, e as culturas da soja e do milho, no verão, obedecendo a um plano de rotação de culturas (Tabela 1).

**Tabela 1** – Histórico de rotação de culturas utilizadas na base experimental – Palmeira das Missões, RS.

	<b>ANOS AGRÍCOLAS</b>				
	<b>2000/01</b>	<b>2001/02</b>	<b>2002/03</b>	<b>2003/04</b>	<b>2004/05</b>
<b>INVERNO</b>	Aveia	Nabo Forrageiro	Trigo	Trigo	Consórcio*
<b>VERÃO</b>	Soja	Milho	Soja	Soja	Milho

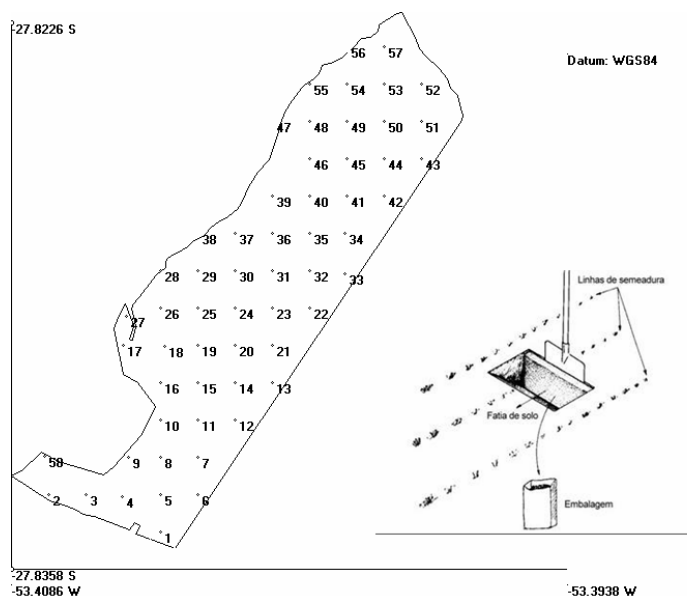
\* Aveia + Nabo Forrageiro + Tremoço Azul

Coletaram-se amostras de solo em uma malha regular georeferenciada de 100 por 100 metros totalizando 58 pontos (Figura 2). Foram colhidas amostras de solo, em maio de 2002, na camada de 0 a 10 cm. A coleta das amostras simples deu-se pela abertura de trincheiras transversais a linha de plantio, seguindo recomendações da Comissão (2004), conforme ilustrado na Figura 2.

As determinações foram realizadas em terra fina seca ao ar, segundo metodologias descritas por Tedesco et al. (1995) e Embrapa (1997). Foram determinados em laboratório os teores de: cálcio, magnésio, alumínio trocável, fósforo, potássio, pH e teores de argila. O conteúdo de carbono orgânico foi determinado por metodologia descrita por Nelson e Sommers modificado (1982).

A fertilidade do área em estudo foi avaliada tomando-se como parâmetro dados apresentados no manual de recomendação da Comissão (2004), que atualmente é vigente na região sul do Brasil, e os dados apresentados por Schlindwein (2003). Este último foi utilizado pois apresenta resposta das culturas a níveis mais elevados de fósforo e potássio dos solos apresentados pela recomendação da Comissão (2004).

Inicialmente, para cada atributo estudado, efetuou-se uma análise descritiva dos dados pela estatística clássica. Em seguida, também para cada atributo, através da geoestatística efetuou-se a análise da dependência espacial por meio do semivariograma. Para isso, foi utilizado o programa computacional Geovisual (Yamamoto, 2002). Desta forma, o ajuste do semivariograma aos seus modelos (esférico, exponencial, gaussiano, linear, sem patamar e efeito pepita puro) foi exclusivamente efetuado por meio da análise do indicativo da eficiência do ajuste (IGF), conforme sugestão de Trangmar et al. (1985).



**Figura 2** – Mapa da área de estudo com os pontos georeferenciados e detalhe da metodologia utilizada para a coleta de solo georeferenciada amostragem – Palmeira das Missões, RS.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das propriedades químicas avaliadas nos cinquenta e oito pontos georeferenciados da área em estudo são apresentados na Tabela 2. Nela têm-se o resultado da estatística descritiva, onde se verifica substancial variabilidade na maioria das características do solo.

Analisando os dados, observam-se altos valores de coeficientes de variação (C.V.) nos dados, que afirmam em um primeiro momento, a avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo como elevada. A amplitude do C.V. apresentado teve seu menor valor na saturação por base com 2% e seus maiores valores no alumínio e saturação por alumínio que apresentaram 292 e 336% respectivamente. Estes últimos devem ser tratados com cautela, pois são fortemente influenciados por um ponto que ficou alocado em uma pequena área de campo nativo incorporada ao cultivo há menos tempo e, conseqüentemente, apresentava altos teores de alumínio, o qual não representava a realidade do restante da gleba que tinha histórico de uso de calagem. Nos demais atributos avaliados, o fósforo e o potássio apresentaram também altos C.V., com 75 e 37% respectivamente.

Esta alta variabilidade encontrada nos dados deve ser avaliada segundo os parâmetros de fertilidade do solo vigentes, permitindo assim fazer-se análise agronômica dos dados. Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentadas as classificações de fertilidade sugeridas pela Comissão (2004) e por Schindwein (2003), e o enquadramento da área em estudo em cada classe.

Avaliando a distribuição em percentagens dentro das diferentes classes apresentadas pela Comissão (2004) de fertilidade, obtem-se que em 83% dos 58 pontos avaliados encontram-se na classe de textura 1 e apenas 1 ponto foi enquadrado na classe textural 3, caracterizando assim que a área em estudo apresenta baixa variação no seu conteúdo de argila. Este fato é de grande importância, pois, a classe textural é condicionante de importantes características químicas e físicas do solo. A capacidade de retenção de água e o teor de água disponível para as plantas, por exemplo, são propriedades do solo que apresentam estreita relação com a textura, bem como, com o modo que esta textura varia espacialmente na área. Em estudo realizado na cultura do sorgo, Shatar e Mcbratney (1999) encontraram que as limitações de produção ocorreram em locais onde o solo apresentava baixa retenção de água e onde o pH está fora do intervalo ótimo.

**Tabela 2:** Estatística descritiva dos atributos químicos de solos avaliados – Palmeira das Missões, RS.

Características	Média	Desvio padrão	C.V.*	Máximo	Quartil Superior	Mediana	Quartil inferior	Mínimo
Argila (g dm <sup>-3</sup> )	66.22	9.25	25,0	82.00	72.50	65.50	60.16	36.00
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	6.05	0.47	8,0	7.10	6.25	5.97	5.66	5.00
Fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )	7.72	5.77	75,0	34.60	9.32	5.95	3.77	2.00
Potássio (mg dm <sup>-3</sup> )	217.67	79.09	37,0	486.00	249.50	211.00	161.00	97.00
Matéria orgânica (%)	3.47	0.43	13,0	4.90	3.69	3.40	3.09	2.40
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0.07	0.21	295,0	1.50	0.02	-	-	0.00
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6.94	1.51	22,0	10.00	7.95	6.76	5.73	3.50
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3.19	0.63	20,0	4.80	3.61	3.10	2.68	1.90
CTC - efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	10.74	2.12	20,0	16.00	11.61	10.10	8.60	7.00
Saturação de Al (%)	0.84	2.82	340,0	20.76	0.62	-	-	0.00
Saturação de Bases (%)	99.16	2.85	3,0	100.00	99.64	99.29	98.77	79.00

\* Em percentagem.

Logo, uma variação na distribuição espacial da disponibilidade de água para as plantas tenderia a influenciar na variabilidade espacial da produtividade. Esta possibilidade é refletida nos resultados obtidos por Stafford et al. (1996), nos quais a análise de influência do tipo de solo na variação da produtividade sugeriu que a propriedade física do solo mais provável de exercer influência na produtividade é a textura, que exerce um papel principal na determinação da água disponível para as plantas.

Quanto aos teores de matéria orgânica (MO), a área apresentou valores que vão da classe muito baixa (MB) a muito alta (MA), sendo porém a frequência destes dois extremos pouco expressivos na distribuição geral dos dados (Tabela 4). Os valores considerados médios e altos prevalecem segundo classificação adaptada da Comissão (2004). Este fato pode ser atribuído aos anos de manejo desta gleba em plantio direto e com sistema de rotação de culturas com alto aporte de resíduos que contribuíram para a recuperação do estoque de MO.

É importante relatar que a matéria orgânica apresentou-se como importante indicadora da qualidade do solo, pois através do mapa temático de variabilidade apresentada por ela (Figura 4) foi possível diagnosticar varias interferências de manejo realizadas na área.

Quanto ao pH a grande concentração dos pontos foram nas classes média (M), alta (A) e muito alta (MA) (classes adaptadas da Comissão, 2004). Nestes valores, foram encontrados oito pontos (14% da área) que apresentaram pH acima de 6,7. Segundo relatos do proprietário da área estes pontos coincidem com antigos depósitos temporários de calcário, comumente utilizados na região para facilitar as freqüentes operações de calagem realizada no modo convencional de cultivo. Alguns também coincidem com locais onde houve mobilização de solo para desfazer terraços e fechar voçorocas, nestes foi adicionada uma dose extra de calcário.

Neste sentido, pode-se avaliar a relevância da utilização das ferramentas de agricultura de precisão na identificação de problemas existentes nas áreas produtivas e que afetam a produtividade das culturas. Por outro lado, pode-se avaliar como seria uma possível avaliação da fertilidade desta área pelos métodos convencionais de avaliação (agricultura pela média), onde por certo estas limitações, tanto por excesso como por deficiência de um corretivo seriam transformadas para uma média dificultando a visualização dos problemas presente. Segundo relatos do proprietário da área, os locais com baixo conteúdo de MO coincidem com práticas de manejo realizadas na área, como o local onde há alguns anos realizou-se o fechamento de uma voçoroca até então existente.

**Tabela 3** - Classificação da Comissão (2004) e de Schlindwein (2003) e situação da área referente aos teores de fósforo – Palmeira das Missões, RS.

Interpretação	Classes de solo conforme o teor de argila segundo a Comissão (2004) <sup>(1)</sup>			Situação da Área %	Schlindwein (2003)* 1 P mg dm <sup>-3</sup>	Situação da Área %
	1	2	3			
	P mg dm <sup>-3</sup>					
Muito Baixo	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 4,0	2	≤ 4,0	28
Baixo	2,1 - 4,0	3,1 - 6,0	4,1 - 8,0	28	4,1 - 8,0	43
Médio	4,1 - 6,0	6,1 - 9,0	8,1 - 12,0	30	8,1 - 12,0	16
Alto	6,1 - 12,0	9,1 - 18,0	12,1 - 24,0	31	12,1 - 16,0	5
Muito Alto	> 12,0	> 18,0	> 24,0	9	> 16,0	9

<sup>(1)</sup> Teores de Argila: classe 1 > 60%; classe 2 = 60 a 41 %; classe 3 = 40 – 21% de argila. \* Tese doutorado.

**Tabela 4:** Situação dos conteúdos de argila, matéria orgânica e valores de pH em relação aos dados adaptados da Classificação (2004), - Palmeira das Missões, RS.

Argila		Matéria orgânica*			pH água*			
Classes da Comissão(2004)	Situação da	Classes da Comissão (2004)	Situação da	Classes da Comissão (2004)	Situação da			
Teor %	Classes	Teor %	Interpretação	Teor %	Interpretação	Teor %	Interpretação	
	Área %						Área %	
< 20	4	0	≤ 2,5	Muito Baixo	2	≤ 5,0	Muito Baixo	2
21 - 40	3	2	2,6 - 3,0	Baixo	12	5,1 - 5,4	Baixo	9
41 - 60	2	15	3,1 – 3,5	Médio	41	5,5 - 6,0	Médio	40
> 60	1	83	3,5 – 4,5	Alto	43	6,1 – 6,5	Alto	31
			> 4,5	Muito Alto	2	> 6,5	Muito Alto	19

\* Classes adaptadas da Comissão (2004).



**Tabela 5:** Classificação da Comissão (2004), e situação da área referente às concentrações de potássio no solo – Palmeira das Missões, RS.

Interpretação	CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )			Situação da Área %	Schlindwen (2003)* mg dm <sup>-3</sup>	Situação da Área %
	> 15,0	5,1 - 15,0 mg de K dm <sup>-3</sup>	≤ 5,0			
Muito Baixo	≤ 30	≤ 20	≤ 15	0	≤ 60,0	0
Baixo	31 – 60	21 - 40	16 – 30	0	61 – 120	5
Médio	61 – 90	41 - 60	31 – 45	0	121 – 180	33
Alto	91 – 180	61 - 120	46 – 90	10	181 – 240	31
Muito Alto	>180	>120	>90	90	> 240	31

\* Tese doutorado.

**Tabela 6:** Classificação da Comissão (2004), e situação da área em relação aos teores de cálcio e magnésio – Palmeira das Missões, RS.

Interpretação Classes	Cálcio		Magnésio	
	Teor cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Situação da Área %	Teor cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Situação da Área %
Baixo	≤ 2,0	0	≤ 0,5	0
Médio	2,1 - 4,0	0	0,6 - 1,0	0
Alto	> 4,0	100	> 1,0	100

Logo, as baixas concentrações de MO encontradas nestes locais ocorrem devido à inversão de horizontes durante o fechamento da referida voçoroca ou pela remoção do horizonte superficial pelo processo erosivo. Naquela prática, pode ter ocorrido raspagem superficial do solo (horizonte A) e exposição do horizonte subsuperficial (horizonte B) o qual naturalmente apresenta concentrações de nutrientes e matéria orgânica inferiores aos encontrados na camada superficial. O produtor tentou compensar a exposição do horizonte subsuperficial pelo incremento do uso de insumo como fertilizantes e corretivos. Porém, a capacidade produtiva do solo destas áreas está mais relacionada com o declínio do teor de MO e mesmo da atividade biológica do que com a elevação de teores de nutrientes (Amado, et al., 2004).

Avaliando-se os teores de fósforo, segundo recomendações de Comissão (2004), observa-se que 60% dos pontos apresentaram teores abaixo do nível crítico (Tabela 3). Estes valores são alterados quando são submetidos à análise tomando como parâmetro as classes propostas por Schlindwein (2003). Este autor, em estudo de doutorado encontrou níveis de resposta diferentes dos apresentados pela Comissão (2004), para solos da classe 1. Desta forma, pelas classes de P proposta por Schlindwein (2003), 87% da área encontra-se abaixo do nível de suficiência. Esta alta variabilidade apresentada pelo fósforo é confirmada pela avaliação do seu coeficiente de variação que foi de 74%. A ocorrência desta variabilidade pode ser atribuída a fatores naturais como sua baixa concentração natural nos Latossolos e conseqüente alto poder tampão aliada a sua dinâmica de baixa mobilidade pode resultar em alta variabilidade. Igual importância pode ser atribuída à ação antrópica que contribui para aumentar a variabilidade, manejando a área sem considerar a variabilidade do teor de argila do solo e a variabilidade da produtividade. Juntos estes dois fatores determinam a construção da variabilidade dos teores de fósforo do solo. Perante a variabilidade apresentada pelo fósforo, há indícios que a deficiência deste nutriente possa ser uma das causas da variabilidade da produtividade encontrada nesta área. Segundo relatos do produtor, ao longo dos anos foi utilizada taxa única de aplicação de fertilizantes na área com aplicação de fórmula com maior concentração de potássio do que fósforo. Este fato ajuda a entender os altos valores encontrados para o potássio na área. Segundo classificação apresentada pela Comissão (2004), 90% dos pontos apresentaram classificação de potássio muito alta (MA) e 10% alto (A) (Tabela 5). Em contrapartida, pelos dados de Schlindwein (2003), os dados são classificados entre as classes baixo (B) e muito alto (MA), indicando assim possibilidade de haver zonas com possibilidade de resposta a este elemento. Assim como encontrado para o fósforo o potássio apresentou elevado CV, confirmando a alta variabilidade deste elemento na área em estudo.

Segundo as classes propostas pela Comissão (2004), para o solo com CTC entre 5,1 e 15,0  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  o nível crítico de K é 60  $\text{mg dm}^{-3}$ , sendo o limite entre a classe média e alta. Mesmo considerando as classes propostas por Schindwein (2003), que apresentou nível crítico de 180  $\text{mg dm}^{-3}$  de potássio, observou-se que 62% dos pontos estão acima deste patamar, ou seja, com pouca probabilidade de resposta a aplicação deste nutriente. Daí a necessidade de avaliar a relevância agrônômica da variabilidade presente nas áreas agrícolas, pois nesta área, para os teores de potássio, o C.V. foi 36% e a amplitude da variabilidade alcançou 80%, mas o significado agrônômico deste, dever ser avaliado com cautela pois os níveis estão acima do nível crítico.

Com relação ao Ca e Mg a área em estudo apresenta bons níveis de fertilidade com os valores classificados como altos e muito altos.

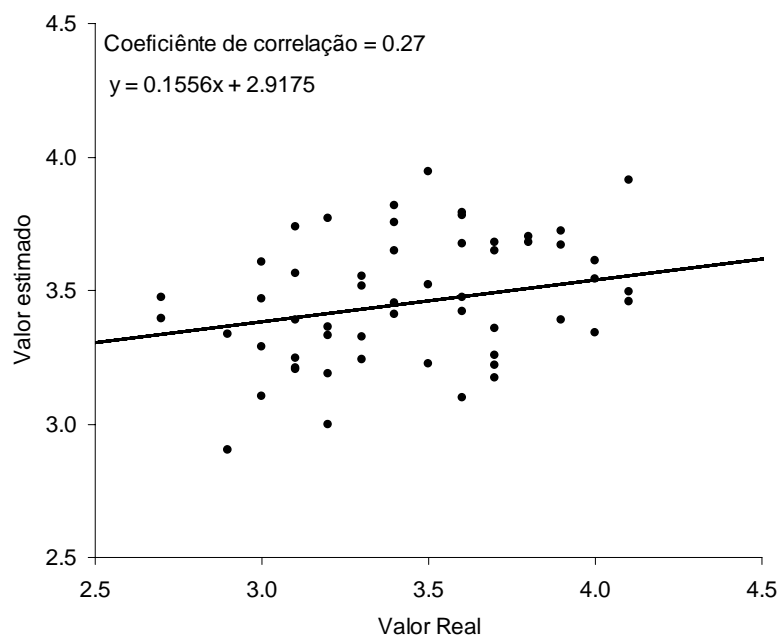
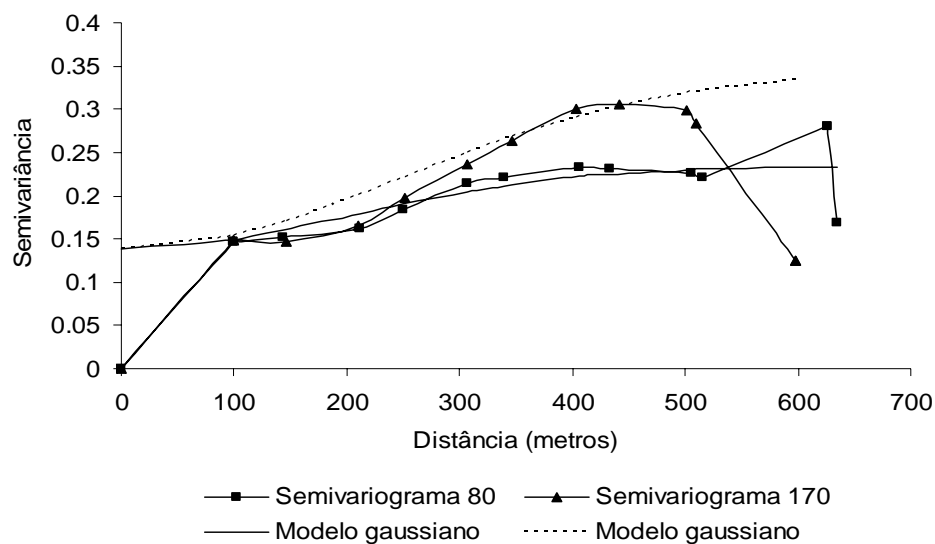
O estudo da variabilidade espacial dos dados de fertilidade demonstra, que a base experimental revelou dependência espacial consistente, pois abrangeu uma faixa de correlação com a distância que variou de 210 a 1277 metros (Tabela 7). Os alcances indicaram que o grid amostral utilizado (100 x 100 m) foi adequado, pois os alcances apresentaram-se sempre superiores à distância amostral.

**Tabela 7:** Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados – Palmeira das Missões/RS.

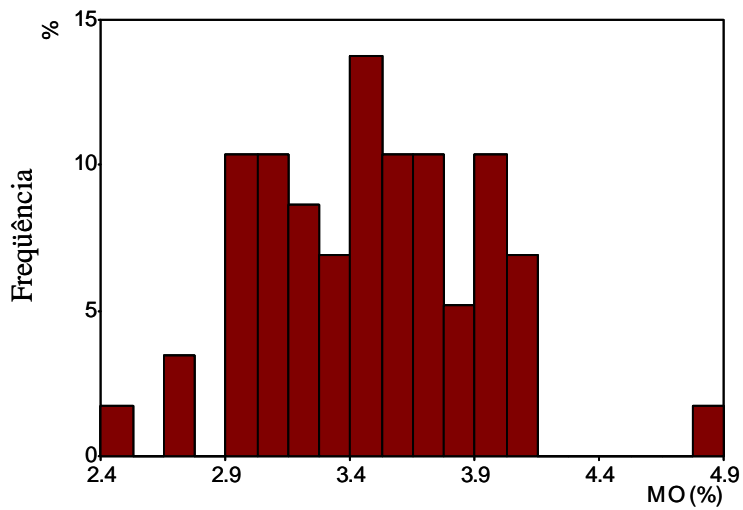
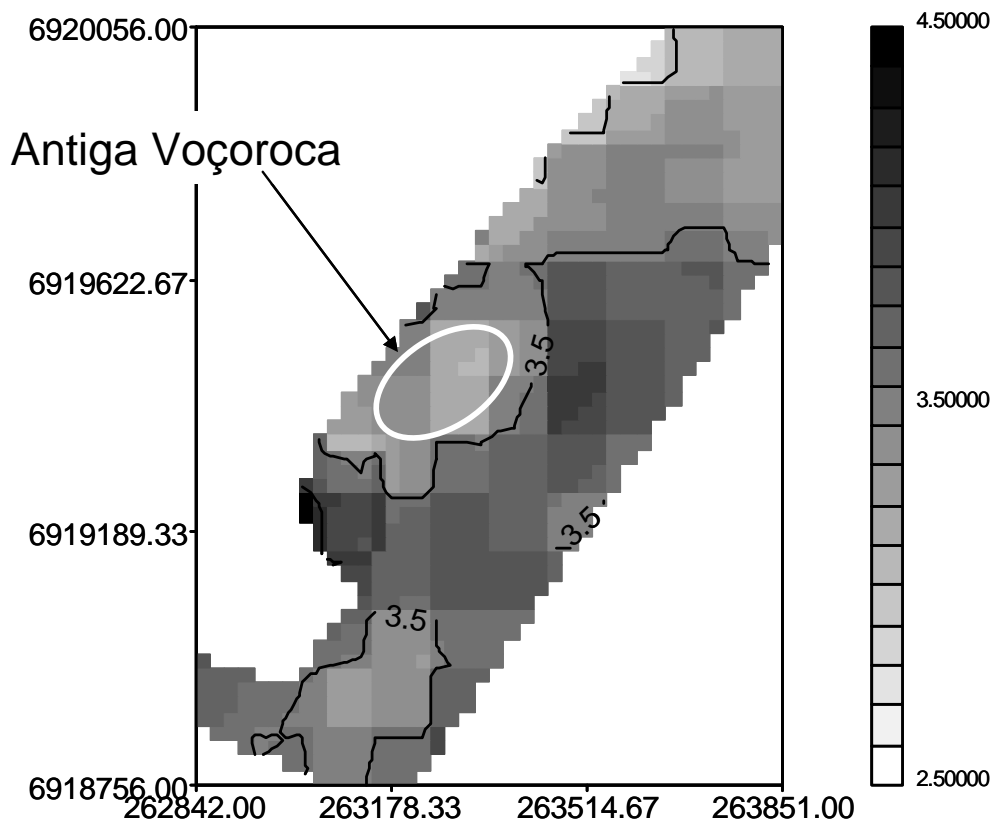
Atributo	Modelo	Direção	Alcance (a)	Dependência espacial	
		graus	metros	IDE	Intervalo
<b>MO</b>	Gaussiano	80	487	50	Moderada
	Gaussiano	170	606	40	Moderada
<b>Argila</b>	Exponencial	-	1277	20	Forte
		-			
<b>Fósforo</b>	Esférico	25	280	16	Forte
	Esférico	115	200	16	Forte
<b>Potássio</b>	Gaussiano	0	600	56	Moderada
	Gaussiano	90	210	56	Moderada
<b>pH</b>	Gaussiano	0	450	63	Moderada
	Gaussiano	60	350	63	Moderada

Através do índice de dependência espacial (IDE), proposto por Cambardela et al. (1994) obteve-se classificação como forte a dependência espacial para a argila e o fósforo. Nos demais atributos apresentaram dependência espacial considerada moderada.

As análises geoestatísticas indicaram comportamentos distintos para os atributos avaliados (Figuras 3, 5, 7, 9 e 10). Mesmo os semivariogramas se mostrando estruturados, a validação cruzada indicou que os modelos ajustados não produziram uma adequada representação dos dados, conforme indicado pelos coeficientes de correlação, com exceção da MO.



**Figura 3** Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada de MO (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS.



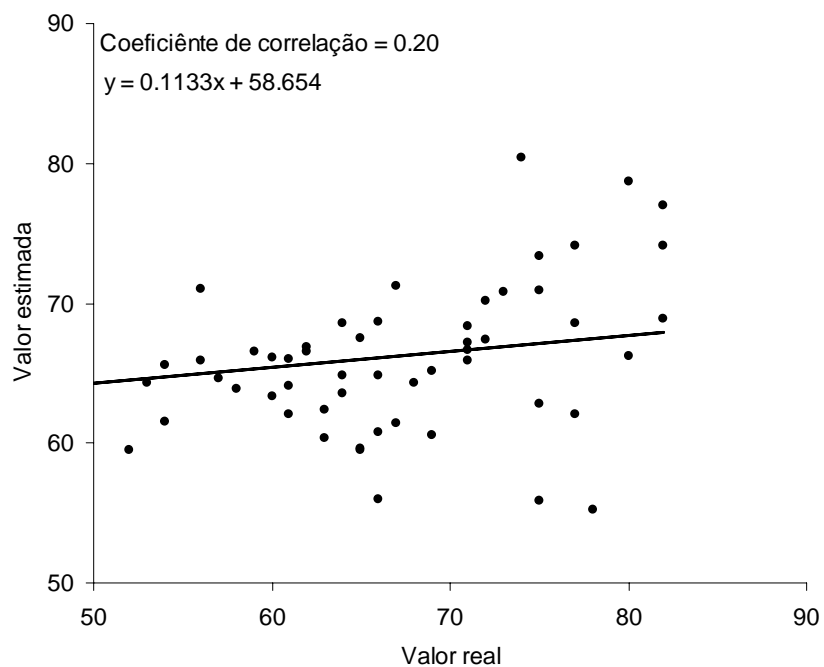
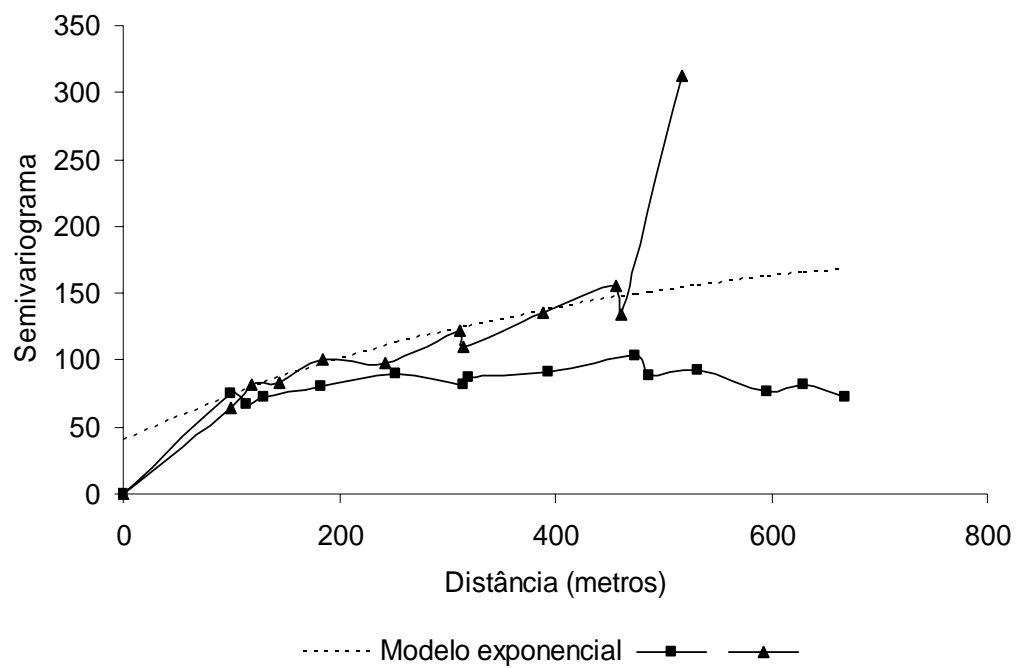
**Figura 4:** Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de MO e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS.

Esta inconsistência pode ser atribuída a vários fatores, entre eles a grade amostral utilizada que não foi suficiente para amostrar o comportamento do semivariograma na sua porção inicial. Também podem ser considerados problemas de amostragem, pois a coleta foi realizada apenas com uma amostragem por ponto, o que pode causar problemas em elementos pouco móveis como o fósforo. Este fato pode ser agravado pelo fato das fertilizações nas áreas serem aplicadas toda na linha de plantio. De um modo geral, estes problemas podem ser visualizados através dos elevados valores apresentados pelo efeito pipeta em todos os semivariogramas.

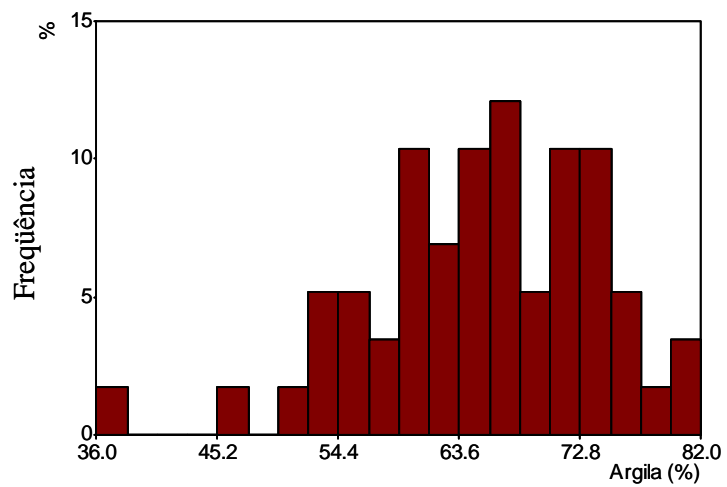
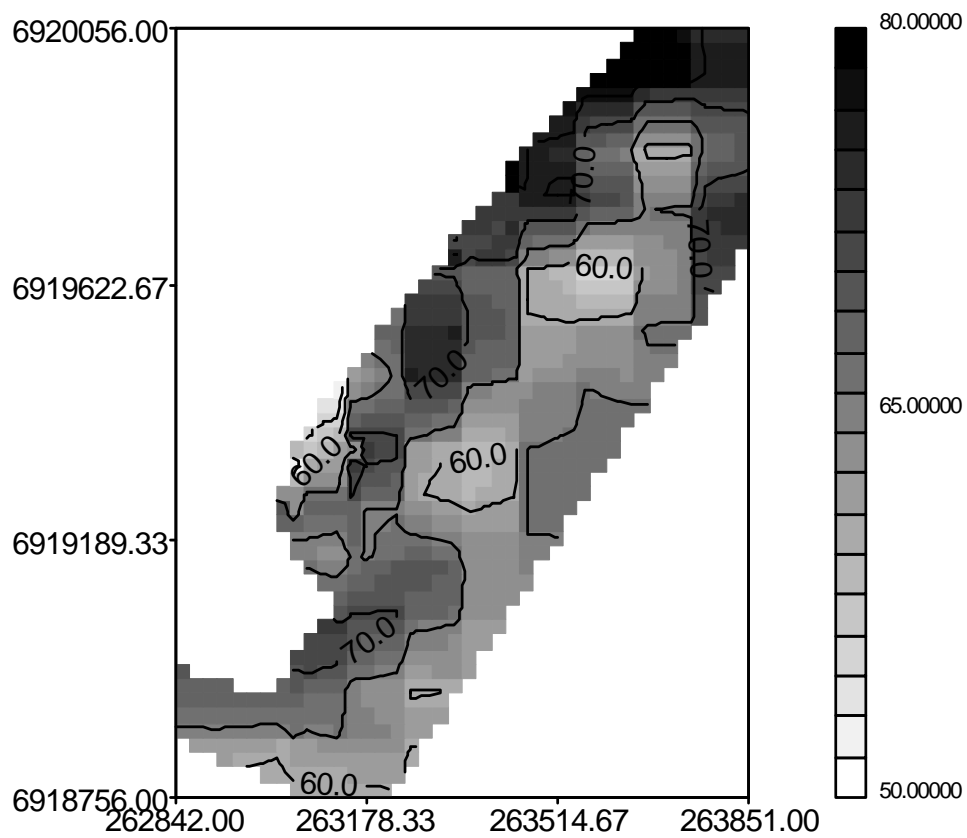
Os mapas interpolados apresentaram distribuição homogênea dos atributos os quais podem ser utilizados para fazer algumas inferências como pode ser verificado observando-se os mapas de argila e fósforo onde é possível visualizar que as maiores concentrações de fósforo ocorrem nos locais onde o teor de argila é menor (Figuras 6 e 8).

No mapa de MO, é indicado um local com baixa concentração deste atributo, o qual coincide, segundo relatos do proprietário, com o local onde há alguns anos foi realizado o fechamento da uma voçoroca. Ao analisar o mapa de argila (Figura 6) neste mesmo local verifica-se que apresenta forte gradiente textural. Este fato pode ser atribuído à decapitação do horizonte A e exposição do horizonte B, ocorrida no processo erosivo e prática de fechamento da voçoroca mencionada. Ainda neste local pode-se verificar altos valores de pH (Figura 12), devido à aplicação em grande quantidade de corretivo, realizada pelo produtor, no intuito de retomar o potencial produtivo deste local.

Maiores concentrações de argila são verificadas também na extremidade da área. Estas coincidem com os locais de maior inclinação verificado naquele terreno e que pode também estar associado a processo erosivo ocorrido nos anos de cultivo convencional com intenso preparo. Já onde são visualizados os menores teores de argila coincide com o platô da área, onde ao longo dos anos apresenta os maiores teores de MO e as maiores produtividades.

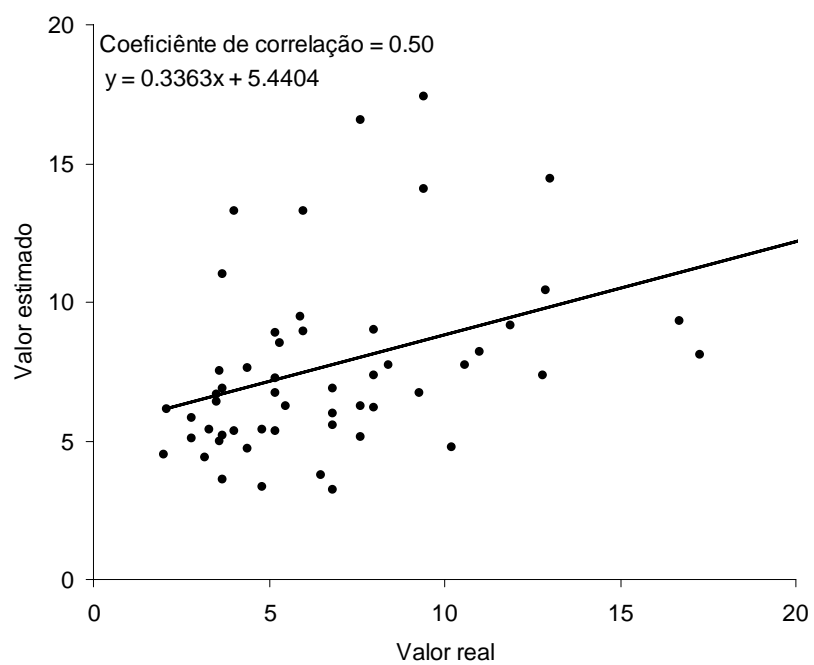
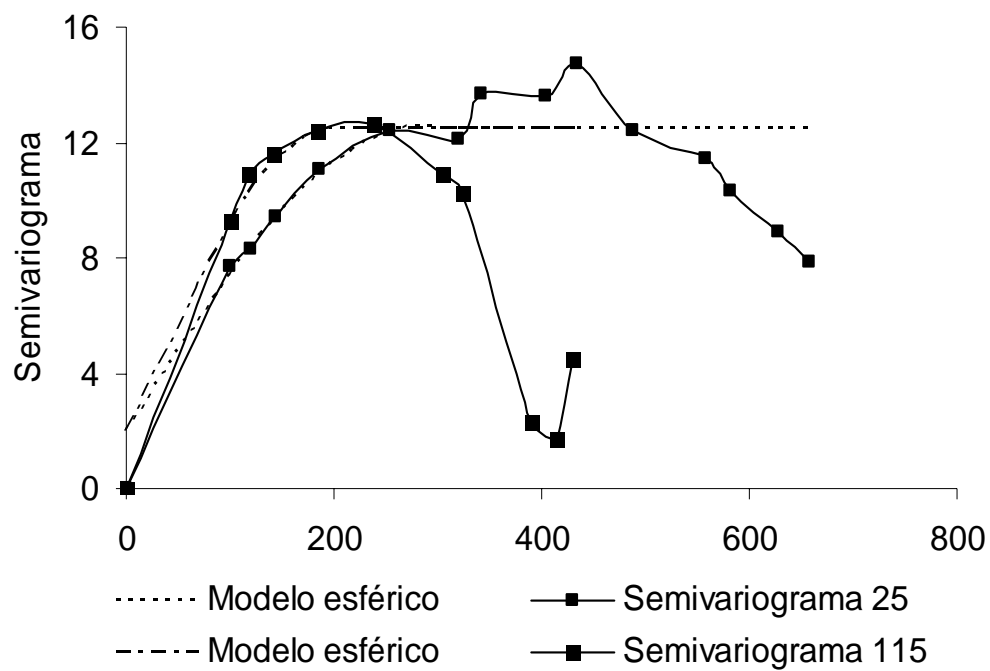


**Figura 5** Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada da argila (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS.

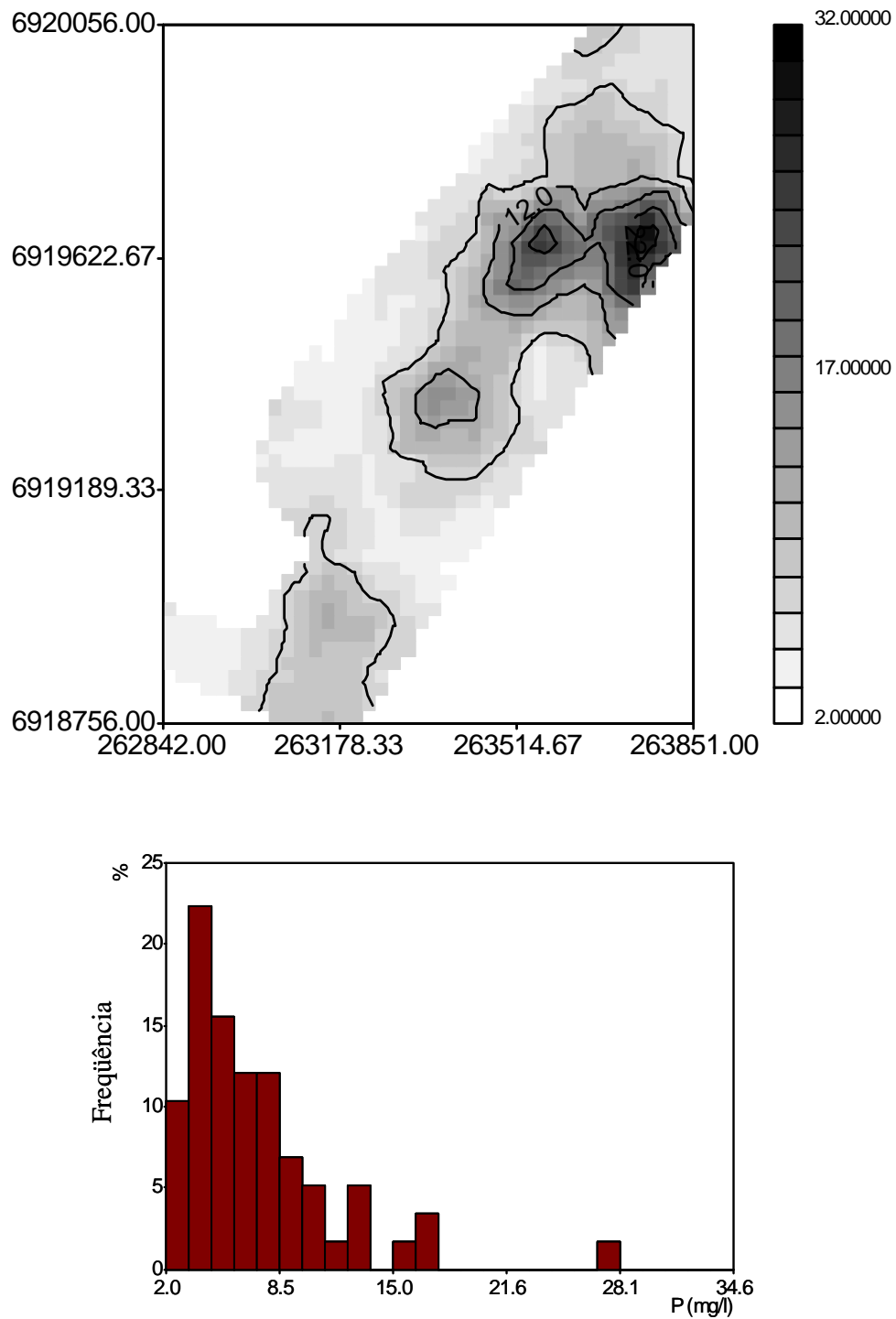


**Figura 6** - Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de argila e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS.

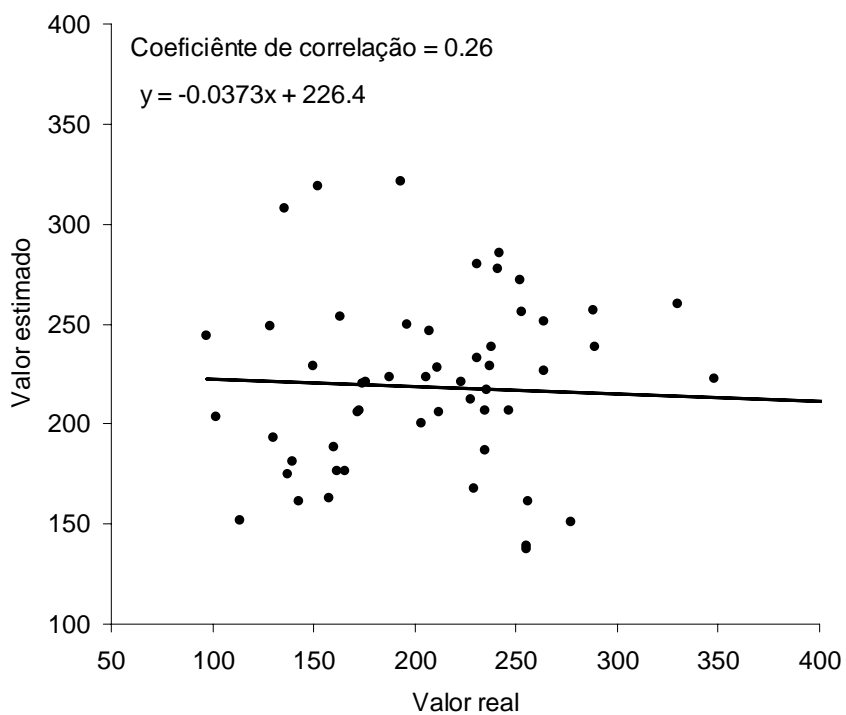
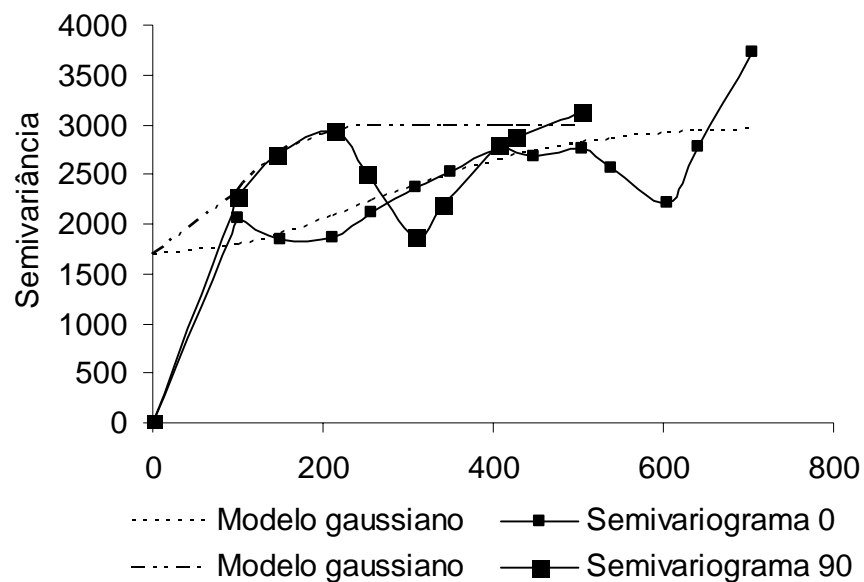




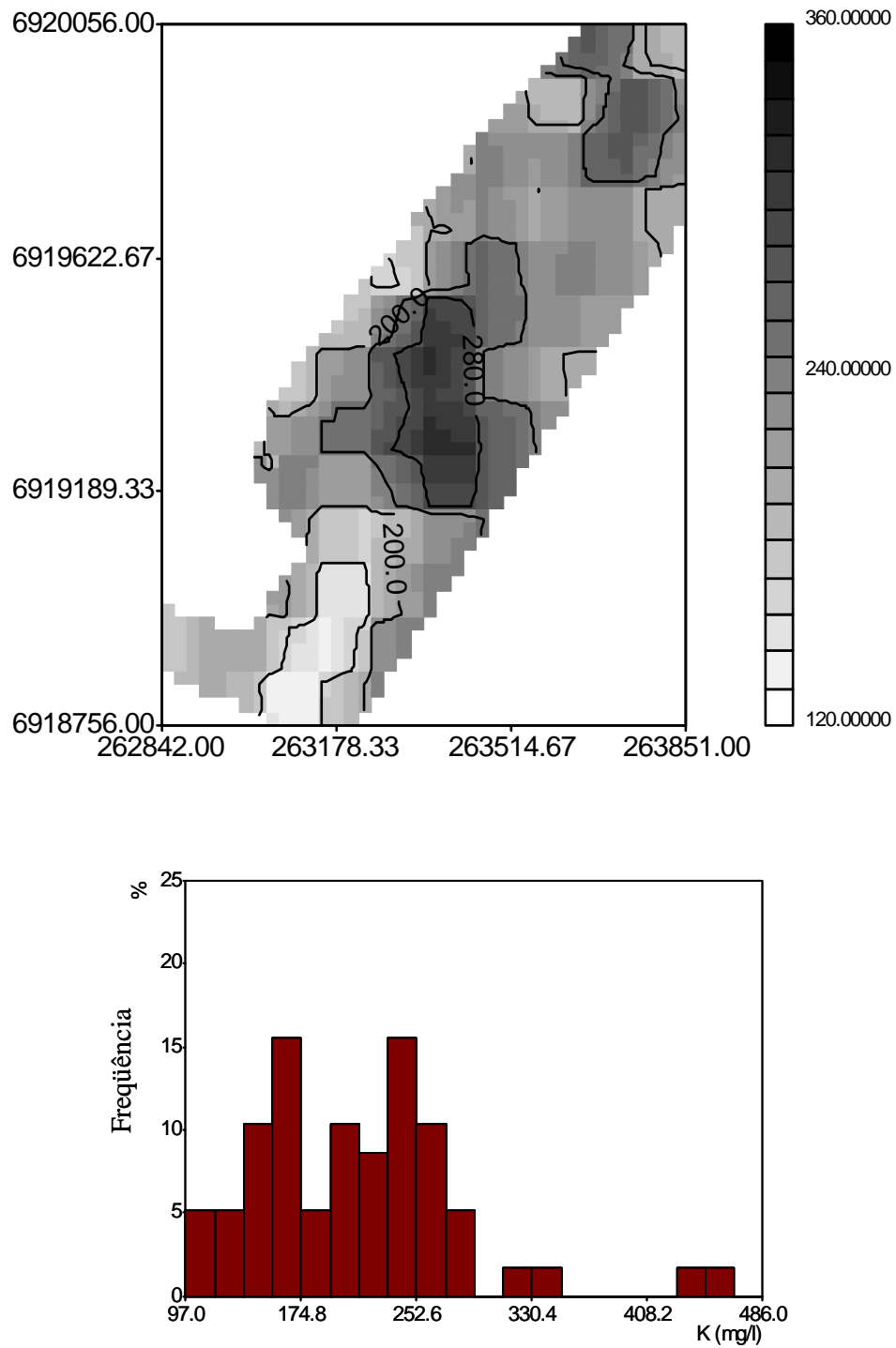
**Figura 7** - Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do fósforo (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS.



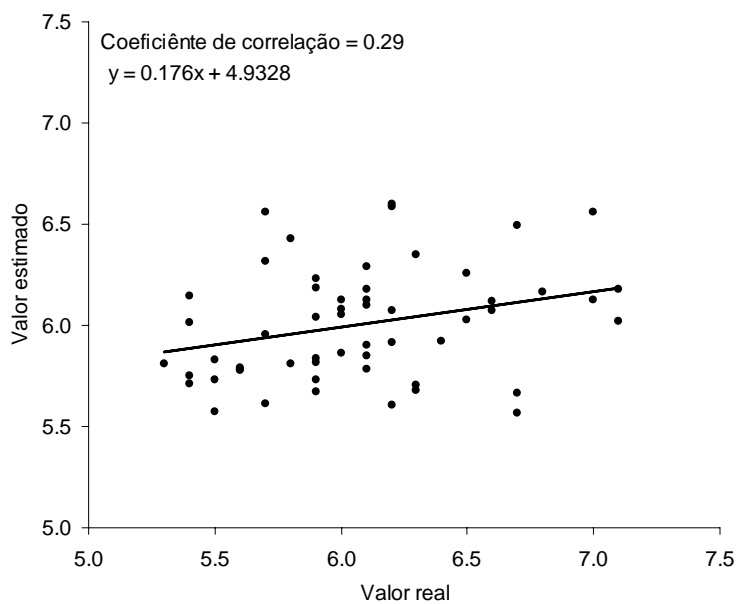
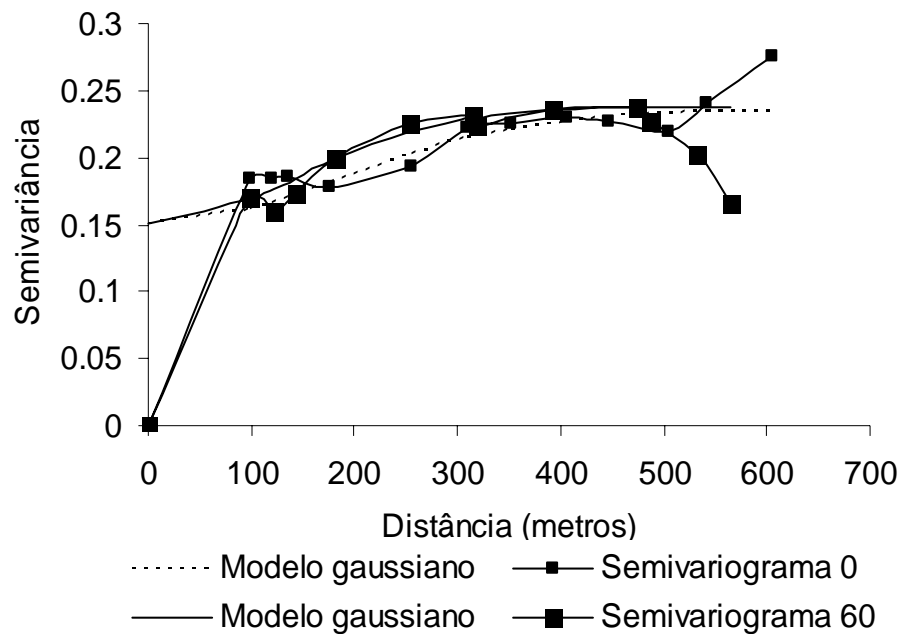
**Figura 8** - Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de fósforo e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS.



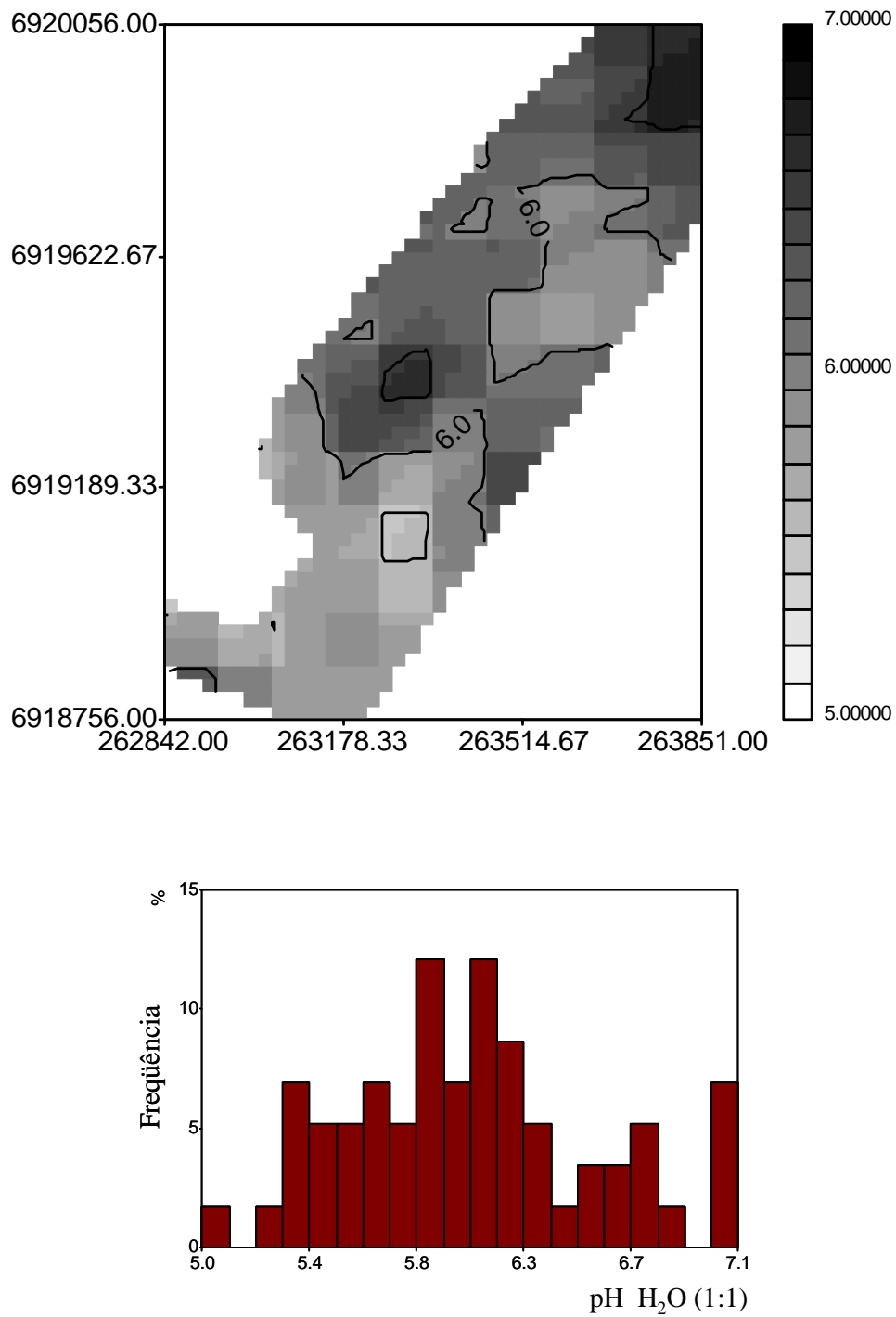
**Figura 9** - Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do potássio (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS.



**Figura 10** - Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de fósforo e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS.



**Figura 11** - Gráfico do semivariograma experimental e da validação cruzada do pH em H<sub>2</sub>O (comportamento anisotrópico) – Palmeira das Missões/RS.



**Figura 12** - Mapa interpolado por krigagem ordinária dos valores de pH em H<sub>2</sub>O e histograma de distribuição de frequência – Palmeira das Missões/RS.

## CONCLUSÕES

- Entre os atributos químicos avaliados, o alumínio, o fósforo e o potássio foram os que apresentaram maior variabilidade. As menores variabilidades foram obtidas no pH, MO e teor de argila.
- A variabilidade do fósforo indicou que 60% dos pontos apresentaram valores inferiores à suficiência segundo a Comissão (2004), ou 87% segundo as classes propostas por Schlindwein (2003).
- A variabilidade do potássio implicou em que 90% dos pontos apresentam valores classificados como muito alto pela Comissão (2004), e 31%, pelos dados de Schlindwein (2003), indicando que nestes locais com excesso de K pode estar ocorrendo desequilíbrio nutricional.
- A área apresenta alto nível de fertilidade com déficit regionalizado de fósforo.
- Os alcances obtidos pela análise geoestatística indicam que o grid amostral utilizado foi adequado.
- Exceto para os dados de fósforo, os modelos ajustados apresentaram baixo coeficiente de correlação com os dados reais.
- As ferramentas de agricultura de precisão são eficientes na identificação de intervenções naturais e antrópicas de manejo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com recursos do Setor de Uso, Manejo e Conservação do Solo e da Água – UFSM, contando com apoio financeiro do CNPq, Fapergs, Manah e AGCO.

Agradecemos a Família Sulzback pela sua acolhida e apoio sempre que necessitada.

## LITERATURA CITADA

- AMADO, T.J.C.; SANTI, L. A., VEZANI, f. Agricultura de precisão como ferramenta de aprimoramento do manejo do solo Revista Plantio Direto, 2004. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo- RS
- CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J., v.58, p. 1501-1511, 1994.
- COELHO, A. M. Agricultura de Precisão: Manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. Tópicos em ciência do solo 3. : 249-290, 2003.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.
- EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária de Solos (Rio de Janeiro). Manual de Métodos de análise de solo/Centro Nacional de pesquisa de solos-2ª ed. ver. atual. Rio de Janeiro, 1997, 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro,RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. – Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 1999.
- MOLIN, J.P. MENEGATTI, L.A.A. In. 2 Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão. Viçosa, MG 2002.



- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (ed.) *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.2, p.539-579. (Agronomy, 9).
- PIRCE, F.J. & NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. *Adv Agron.*, 67:1-85,1999.
- REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo – planta – atmosfera*. 4 ed. Campinas – SP Fundação Cargil. 1984, 445p.
- SCHLINDWEIN, J.A. *Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto*. Porto Alegre – UFRGS, 2003. 169f. Tese doutorado.
- SHATAR, M. T., MCBRATNEY, A. B. Empirical modeling of relationships between sorghum Yield and soil properties. *Precision Agriculture*, Kluwer Academic Publishers, v.1, p.249-76, 1999.
- STAFFORD, J. V., AMBLER, B., LARK, R. M., CATT, J. mapping and interpreting yield variation in cereal crops. *Comput. Electron. Agr.*, v.14, p.101-19, 1996.
- SOUZA, L.S. *Variabilidade espacial do solo em sistema de manejo de manejo*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 162p. (Tese de Doutorado).
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2. Ed.ver. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos,5).
- TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, v.38, p.45-94, 1985.
- YAMAMOTO, J. K. *Guia do Usuário. Sistema Geovisual 2.2*. 2002, 82 p.b

### **CAPÍTULO III**

## CAPÍTULO III

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO: CORRELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE.**

## Resumo

Estudos considerando a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade das culturas tem causado muito interesse na comunidade científica na última década, e grande foram os avanços neste sentido. Entretanto o entendimento do grau de correlação existente entre elas ainda é um conhecimento em construção. Neste sentido, esse trabalho foi conduzido com o objetivo de encontrar a correlação entre a produtividade de três culturas (soja, milho e trigo) e as características químicas do solo. Foi conduzido um experimento por 5 anos (2000 a 2005) numa área de 57 ha no município de Palmeira das Missões. Foram coletadas amostras de solo georeferenciadas em maio de 2002 com malha regular de 100 x 100 metros a uma profundidade de 10 cm. Foram analisadas as safras de soja 2000/01, milho 2001/02, soja 2002/03, trigo de 2003, soja 2003/04 e milho 2004/05. Os dados de produtividade foram coletados com uma colhedora equipada com sensores, computadores e um receptor de sinal GPS. Para cada ponto de coleta de solo foi calculada uma produtividade média utilizando-se os dados de produtividade dentro de um raio de 30 m ao redor do ponto de coleta do solo. Os dados de produtividade e solo foram analisados pela matriz de correlação de Pearson. Foram determinadas equações polinomiais quadráticas médias para as safras soja 2001/02 e soja 2003/04, para tal utilizou-se como parâmetro as classes de fertilidade propostas por Schlindwein (2003) para fósforo e potássio. Para pH em H<sub>2</sub>O e MO foram utilizadas classes adaptadas da Comissão (2004). A área em estudo apresentava alta fertilidade. Foi encontrada baixa correlação entre os atributos químicos do solo e as produtividades. As correlações negativas encontradas entre produtividade e teor de argila variaram de -0,25 a -0,46 para milho 2005 e soja 2004 respectivamente. As curvas de resposta média da soja aos atributos do solo, permitiram encontrar, ainda que preliminarmente, os teores de Máxima Eficiência Técnica (MET) e de Máxima Eficiência Econômica (MEE) dos atributos no solo. A MEE obtido para P, pH e MO foi 4,4 mg dm<sup>-3</sup>; 5,5 e 3,2% respectivamente. A MET para P foi de 14,4 mg dm<sup>-3</sup>, para o pH foi de 5,9 e para a MO é de 4,1%. Valores de pH acima da MET reduziram a produtividade das culturas.

**Palavras chave:** agricultura de precisão, variabilidade espacial, atributos químicos do solo, análise geoestatística, mapas de produtividade, curvas de resposta, máxima eficiência técnica, máxima eficiência econômica.

## Chapter III

**Spatial variability of a Latossolo Vermelho with No-til System: Correlation between chemical attributes of the soil and productivity.**

## Summary

Studies considering spatial variability of soil quimical attributes and crop yield mapping caused a lot of interest to the scientific community on the last decade, and good advances have on this way. However understand this correlation between it still is knowledge in growth. On this way, this work was conducted with the aim to find a correlation between three cultures yields (soybean, corn and wheat) and soil chemical characteristics. An experiment was conducted over five years (2000 to 2005) in an area of 57 ha in the municipality of Palmeira das Missões. Geopositioned soil samples were collected in May of 2002, with a regular grid of 100x100 meters and at a depth of 0 to 10 cm. Yield data of soybean 2000/01, corn 2001/02, wheat 2002, soybean 2002/03, wheat 2003, soybean 2003/04 and corn 2004/05 were analyzed. The yield data was collected with a machine equipped with sensors, computers and a GPS receiver. Yield averages for each soil sample point were calculated, using yield data collected at a radius of 30 meters around the point. The yield and soil data were analyzed using the Pearson correlation matrix. Average quadratic polynomial equations were calculated for the yields of soybean 2001/02 and 2003/04, were was used fertility ranges proposed by Schlindwein (2003) for phosphor and potassium. For pH (H<sub>2</sub>O) and OM where used ranges adapted from Comissão (2004). The area studied presents high fertility. A low correlation was found between soil chemical attributes and yield data. Was found a negative correlation between the clay texture and yield change from -0,25 to -0,46 for corn 2005 and soybean 2004 respectively. The average soybean yield response to soil attributes, lat know found, preliminarily, values of maximum technical efficiency (MTE) and maximum Economic Efficiency (MEE) of the attributes in the soil. The MEE found for P, pH and OM was 4,4 mg dm<sup>-3</sup>, 5,5 and 3,2% respectively. The MTE found for P was 14,4 mg dm<sup>-3</sup>, for pH was 5,9 and for OM was 4,1%. Values of pH higher of MTE reduce the crop yield.

**Key Words:** precision agriculture, spatial variability, soil chemical attributes, geostatistical analysis, yield maps, response curves, maximum technical efficiency, maximum economic efficiency.

## INTRODUÇÃO

Grande tem sido o esforço para elucidar as correlações existentes entre a variabilidade de atributos químicos do solo e da produtividade das culturas. A tecnologia de mapeamento da produtividade tem sido disponibilizada comercialmente há vários anos (Lark et al., 1997b). Entretanto, a interpretação destes mapas é ainda incipiente. Esses autores argumentam que, para o potencial do mapeamento da produtividade ser completamente esclarecido, é necessário estabelecer um procedimento para interpretação mais compreensível dos dados. Neste sentido, dados de produtividade e de amostras regionalizadas de solo têm sido utilizados por diversos autores para estudar a correlação entre a variabilidade de propriedades do solo e a produtividade de culturas (Cox & Wardlaw, 1999, Khakural et al., 1999, Coelho et al., 1999, Johnson et al., 1998).

Após identificar o nível de variação de atributos, considerando-se inclusive a variação temporal, o passo mais importante é encontrar as relações de causa e efeito entre os atributos do solo e os dados de produtividade. Isto significa, conforme Kuhar (1997), conhecer o que cada área é capaz de produzir e o meio de atingir seu potencial pleno. Sob este prisma, são concordantes Marques Júnior & Corá (1998), ao afirmar que um bem sucedido sistema de agricultura de precisão seria aquele em que os fatores limitantes para um ótimo retorno econômico e uma máxima proteção ao meio ambiente fossem identificados, caracterizados e manejados nos locais e tempo apropriados.

Analisando resultados de correlações, Zhang et al. (1999) afirmaram que há uma hipótese geral de que a produtividade é função da variação dos nutrientes de solos em adição aos fatores ambientais. Portanto, uma correlação entre produtividade e nutrientes de solo era esperada. Entretanto, em um experimento conduzido, estes mesmos autores não encontraram relação espacial direta entre produtividade e nutrientes. Para os autores, este resultado pode ser devido à qualidade dos dados de solo e às escalas espaciais inconsistentes das fontes de dados (produtividade e nutrientes do solo). Os autores salientaram ainda que, uma vez que as condições ambientais e os nutrientes do solo variam de um campo para outro, uma equação de regressão desenvolvida a partir de uma condição de produção não é adequada para prever a produtividade para outros campos. Entretanto, desenvolver este tipo de relação em múltiplos campos poderia prover os produtores com informação para manejo da fertilidade localizado.

Como um dos pontos importantes no manejo de uma área, Shatar & Mcbratney (1999) citam a identificação das causas da variação da produtividade. Por isso, relações entre produtividade e propriedades do solo precisam ser identificadas. Segundo os autores, na cultura do sorgo, fez-se necessário avaliar as relações pontuais para identificar os fatores que limitam a produção e avaliar com exatidão as necessidades da cultura. A dosagem tradicional de fertilizantes é geralmente baseada na produtividade média obtida a partir de um conjunto de experimentos conduzidos em diferentes locais, este procedimento reduz a exatidão de recomendação para um local específico. As relações estudadas por aqueles autores mostraram que as limitações de produções ocorreram em locais onde o solo apresentava baixa retenção de água e onde o pH estava fora do intervalo ótimo. Deficiências de nutrientes também foram apontadas como causas prováveis nas áreas de baixas produtividades.

Estudando fatores como conteúdo de argila e teor de matéria orgânica, Whelan (2002) verificou que estes atributos contribuem para avaliação dos nutrientes e capacidade produtiva do solo. Estes autores mostraram que a variabilidade espacial destes dois fatores afetou sobremaneira a variação da produtividade das culturas. Intuitivamente, fatores que contribuem para a variabilidade no solo deverão ter importante influência no crescimento da maioria dos cereais.

Este estudo objetivou avaliar a relação entre a produtividade das culturas, gerada a partir de mapas de colheita, e a distribuição espacial de alguns atributos químicos do solo, rotineiramente utilizados na avaliação da fertilidade do solo. Também foram realizadas estimativas preliminares com intuito de determinar níveis críticos de nutrientes específicos para a área em estudo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para esse estudo, foram utilizados dados de produtividade e de atributos do solo, georeferenciados, obtidos de estudos prévios sobre a variabilidade desses fatores, em uma área de lavoura localizada no município de Palmeira das Missões no Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul. Nessa área, há cinco anos são desenvolvidas pesquisas, práticas

de manejo e gerenciamento dos meios de produção, baseados em princípios da agricultura de precisão.

A área corresponde a 57 hectares e está situada entre as coordenadas 262.752 (E) a 263.962 (E), e 6.918.712 (N) a 6.920.149 (N), possuindo altitude aproximada de 600 metros, estando conforme EMBRAPA (1999) na zona da escarpo arenito-basáltico do Planalto Meridional Brasileiro, e o solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 metros.

Esta área vem sendo manejada no sistema plantio direto há aproximadamente oito anos, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno (Tabela 1).

**Tabela 1** – Histórico de rotação de culturas utilizadas na área de estudo – Palmeira das Missões, RS.

ANOS AGRÍCOLAS					
	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05
<b>INVERNO</b>	Aveia	Nabo Forrageirro	Trigo	Trigo	Consórcio*
<b>VERÃO</b>	Soja	Milho	Soja	Soja	Milho

\* Aveia + Nabo Forrageirro + Tremoço Azul

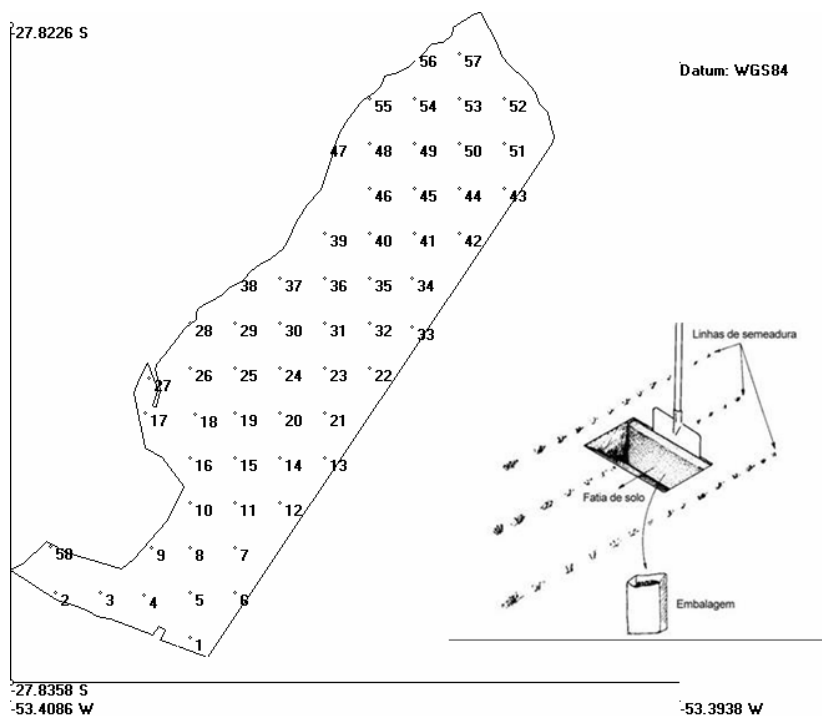
Os dados de produtividade georeferenciados das culturas de soja, de milho e de trigo foram obtidos desde a safra 2000/01, através do auxílio de uma colhedora da marca Massey Ferguson equipada com o Sistema Fieldstar de Agricultura de Precisão, o qual congrega um conjunto de ferramentas como sensores de rendimento Micro Track, cartão de dados PCMCIA para o armazenamento dos dados, e antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global – GPS. A tecnologia embarcada nessas máquinas permite que o usuário registre e armazene, em um determinado intervalo de tempo, a posição (latitude, longitude e altitude) da máquina no campo e a produtividade (quantidade relativa de produção por unidade de área) (Figura 1).

As amostras de solo foram coletadas em uma malha regular georeferenciada de 100 por 100 metros totalizando 58 pontos. Foram colhidas amostras de solo, em maio de 2002, na camada de 0 a 10 cm através de uma pequena trincheira com dimensões 0,5 x 0,20 x 0,30 cm. A coleta das amostras deu-se pela abertura de trincheiras transversais a linha de plantio, seguindo recomendações da Comissão (2004), conforme ilustrado na Figura 2.



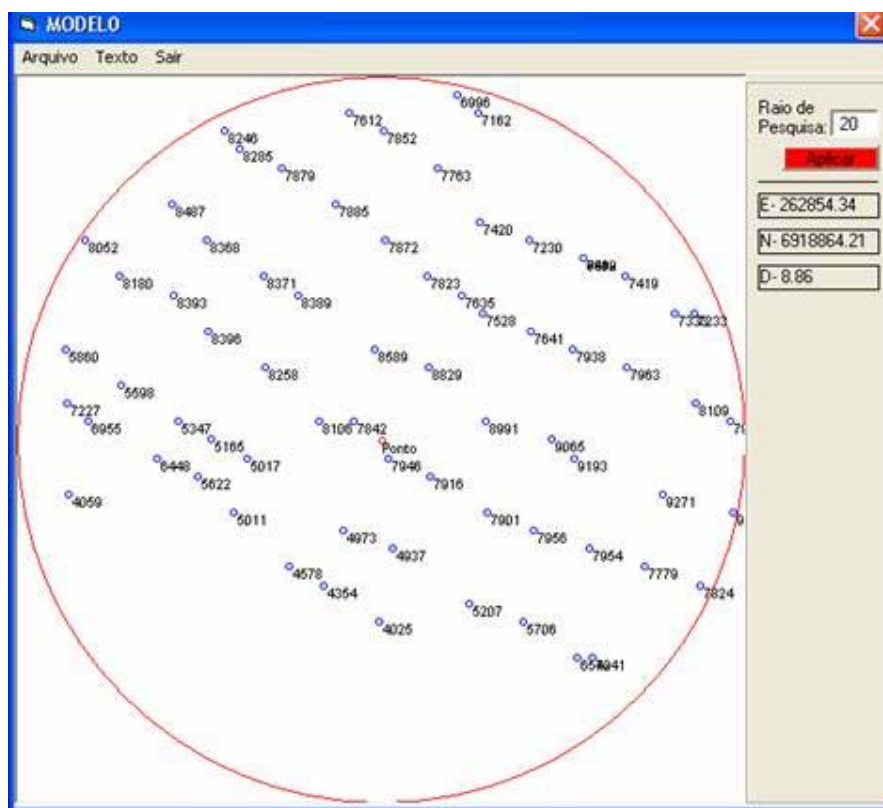


**Figura 1** – Detalhe da colheita georeferenciada da cultura da soja e o exemplo de um mapa de pontos de colheita obtidos durante a obtenção dos dados - (Fonte: Luciano Sulzbach, Proprietário e AGCO do Brasil).



**Figura 2** – Mapa da base experimental com os pontos georeferenciados e detalhe da metodologia utilizada para a coleta de solo georeferenciada – Palmeira das Missões, RS.

Para fins de análise e correlação dos dados de produtividade e de fertilidade, considerou-se como base, a grade amostral utilizada nas coletas georeferenciadas de solo. Utilizando-se o programa CR Campeiro5 (Figura 3) foram realizadas médias locais dos valores de produtividade, considerando-se um raio de 30 metros, ao redor de cada ponto georeferenciado, obtendo assim valores pontuais de produtividade correspondentes próximos aos (mesmos) pontos de amostragem dos atributos químicos.



**Figura 3** – Detalhe de um raio de busca obtido pelo programa CR Campeiro5, utilizado para a obtenção dos dados médios pontuais de produtividade – Palmeira das Missões, RS.

Em um passo seguinte, os dados de produtividade e dos atributos químicos do solo foram submetidos à análise de seus parâmetros estatísticos e em seguida análise de correlação pela matriz de correlação de Pearson em níveis de significância de 1 e 5%.

Com base na revisão bibliográfica, onde vários autores (Shatar & McBratney, 1999; Stafford et al., 1996; Blackmore et al., 1998) encontraram baixas correlações entre os atributos de solo e produtividade quando consideraram os dados de toda a área, optou-se além das análises de correlações diretas, a realização de regressões utilizando como parâmetro as classes de fertilidade propostas por Schlindwein (2003) para fósforo e potássio. Para pH em H<sub>2</sub>O e MO foram utilizadas classes adaptadas da Comissão (2004).

Com as classes dos atributos determinadas, passou-se ao cálculo da média de produtividade por classes. Para tal, foram considerados os cultivos de soja dos anos 2001 e 2003 como base. Essas safras foram utilizadas devido a suas características: a) mantida a mesma cultura; b) dados obtidos em anos sem a ocorrência de adversidades climáticas; c) significância nos coeficientes de correlação; d) parâmetros estatísticos similares; e) estarem temporalmente próximos ao período da amostragem de solo; f) baixos níveis de significância com os atributos de solo. Foram determinadas as produtividades médias de cada classe dos principais atributos do solo. Para tal, foram realizadas as médias de produtividade entre os pontos que se enquadraram nas classes dos atributos do solo. Este procedimento foi realizado para cada atributo considerado. Com a média do atributo em cada classe e a média de produtividade de cada classe foram elaboradas as equações polinomiais quadráticas médias entre o atributo e a produtividade visando determinar as máximas eficiências econômica e técnica.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da estatística descritiva e os valores dos coeficientes de correlação são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. De modo geral, verifica-se elevados coeficientes de variação nos dados apresentados na Tabela 2. Em um primeiro momento, este fato pode sugerir a presença de grande variabilidade dos dados estudados, porém em se tratando de análise de dados georeferenciados tal afirmação deve ser suportada pelo ajuste dos semivariogramas.

**Tabela 2** - Estatística descritiva dos dados de atributos do solo e produtividade.

Variáveis	Média	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação *
Argila (g dm <sup>-3</sup> )	66.22	87.23	9.34	0.25
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	6.05	0.23	0.48	0.08
P (mg dm <sup>-3</sup> )	7.72	33.88	5.82	0.75
K (mg dm <sup>-3</sup> )	217.67	6365.38	79.78	0.37
M O (m/v)	3.47	0.19	0.44	0.13
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0.07	0.05	0.21	2.95
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6.94	2.32	1.52	0.22
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3.19	0.42	0.64	0.20
CTC - efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	10.74	4.47	2.11	0.20
SAT – Al (%)	0.84	8.11	2.85	3.40
SAT – Bases (%)	99.16	8.27	2.88	0.03
Soja 2001 (kg ha <sup>-1</sup> )	3153.40	104041.60	322.55	0.10
Milho 2002 (kg ha <sup>-1</sup> )	7885.33	1844194.00	1358.01	0.17
Soja 2003 (kg ha <sup>-1</sup> )	3290.91	233364.30	483.08	0.15
Trigo 2003 (kg ha <sup>-1</sup> )	3468.59	274439.00	523.87	0.15
Soja 2004 (kg ha <sup>-1</sup> )	2237.48	245562.30	495.54	0.22
Milho 2005 (kg ha <sup>-1</sup> )	6176.26	2547062.00	1595.95	0.26

\* Valores em percentagem

De modo geral, as correlações entre os atributos de solo e aos resultados de produtividade apresentaram-se variadas, esse fato pode ser, parcialmente, compreendido por se estar trabalhando com soja, milho e trigo, que são culturas pertencentes a duas famílias botânicas com desenvolvimento fenológico distintos e que conseqüentemente apresentam diferentes comportamentos para uma mesma condição de qualidade do solo.

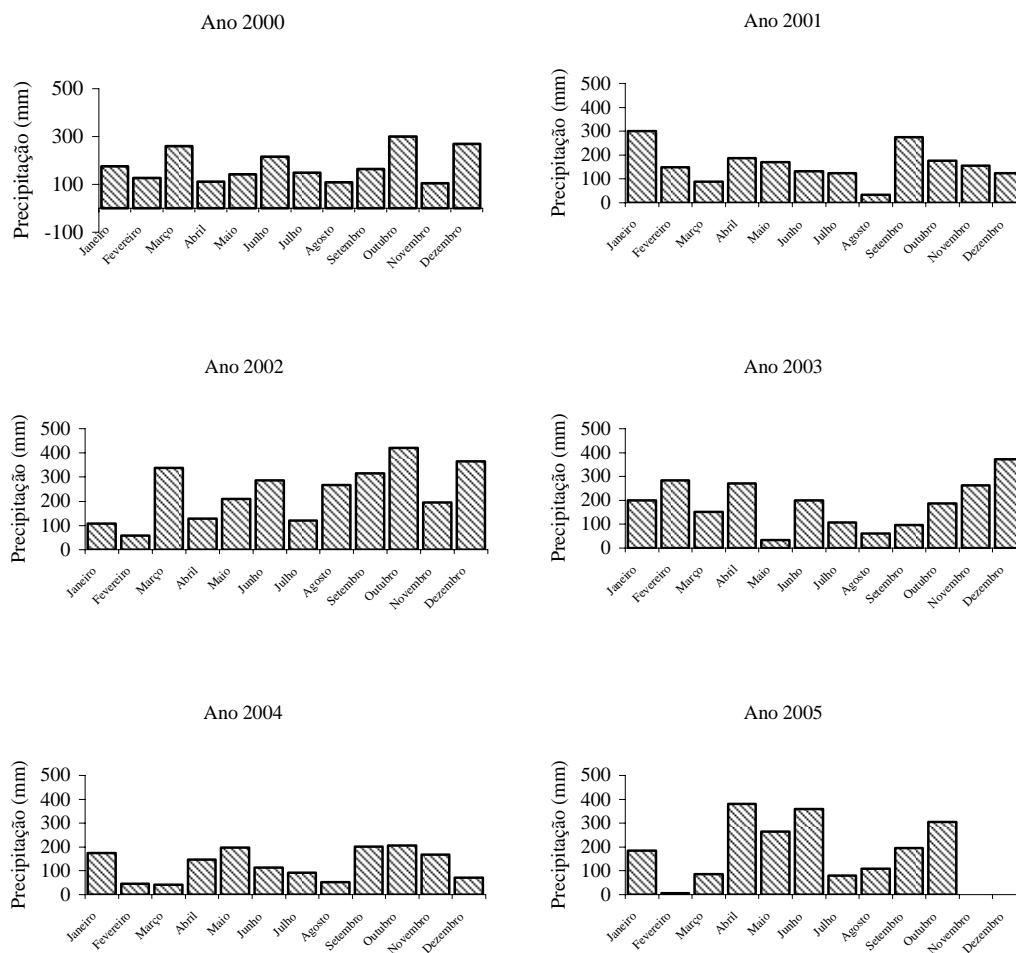
Outro fator que dever ser considerado na análise dos dados é o clima em decorrência de que no período em estudo ocorreram duas estiagens acentuadas que interferiram na produtividade (Figura 4).

**Tabela 3** - Correlações entre dados de atributos químicos do solo e produtividade obtidos através de matriz de correlação de Pearson.

	Soja 2001	Milho 2002	Soja 2003	Trigo 2003	Soja 2004	Milho 2005
Argila (g dm <sup>-3</sup> )	-0.39**	-0.28*	-0.40**	-0.42**	-0.46ns	-0.25ns
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	-0.34*	-0.20ns	-0.11ns	-0.30*	-0.14*	-0.12ns
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0.28*	0.13ns	0.20ns	0.24ns	0.28ns	-0.08ns
K (mg dm <sup>-3</sup> )	-0.11ns	0.01ns	0.08ns	0.04ns	0.05**	-0.11ns
M O (m/V)	0.40**	0.28*	0.32*	0.58**	0.48ns	0.20ns
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0.08ns	-0.08ns	-0.05ns	-0.03ns	-0.16ns	-0.06ns
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0.06ns	0.08ns	0.13ns	0.07ns	0.21ns	0.08ns
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0.26ns	-0.08ns	-0.04ns	-0.19ns	-0.01ns	-0.01ns
CTC – efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0.14ns	0.03ns	0.09ns	-0.01ns	0.14ns	0.04ns
SAT - Al (%)	-0.11ns	-0.09ns	-0.07ns	-0.06ns	-0.17ns	-0.07ns
SAT – Bases (%)	0.11ns	0.09ns	0.07ns	0.05ns	0.17ns	0.08ns

\*\* Significância a 1% de erro; \* significância a 5% de erro; ns não significativo a 5% de erro.

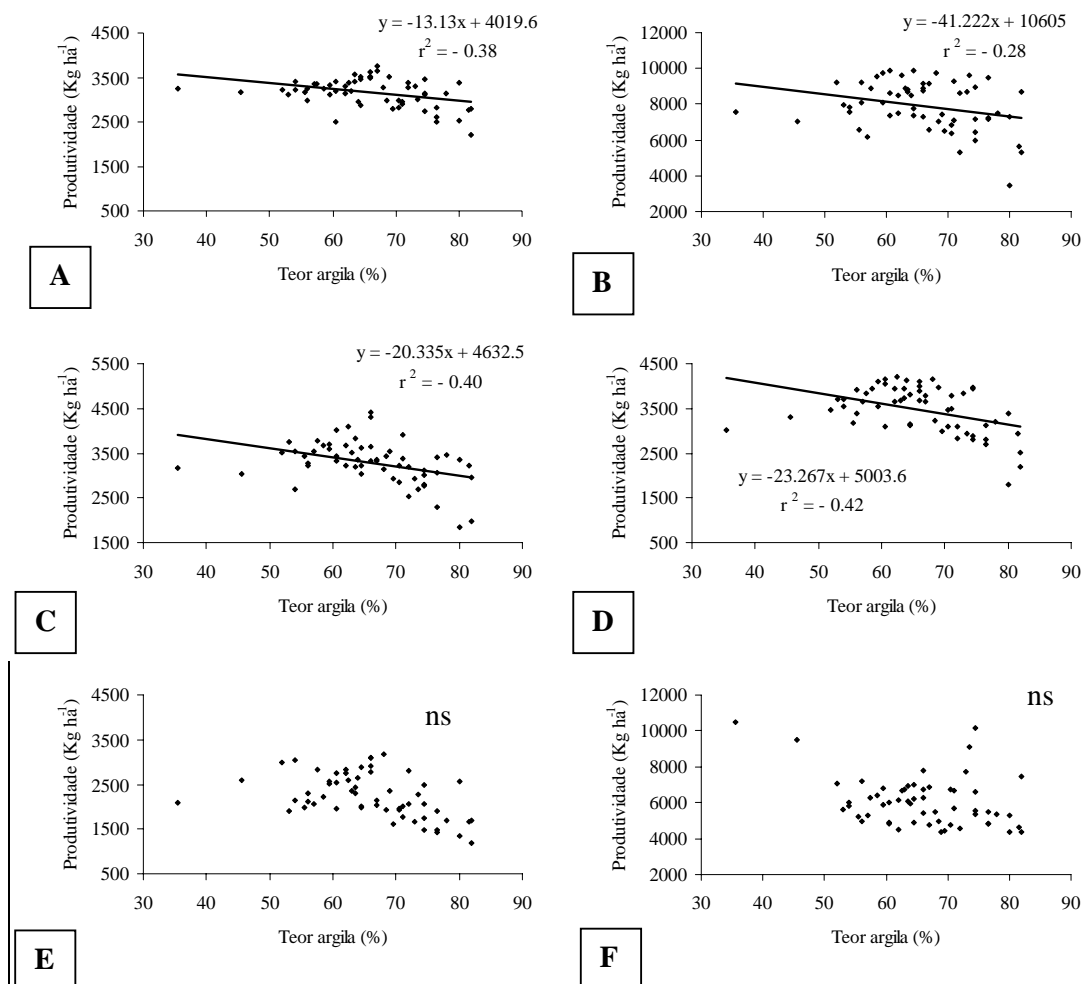
Na análise dos dados em muitos casos encontrou-se correlação inversa, para todas as culturas, como o ocorrido entre os dados de argila e de pH, onde para a argila nos seis diferentes conjuntos de dados de produtividade avaliados, as correlações variaram de -0,25 para milho 2005 a -0,46 para a soja 2004.



**Figura 4** - Histogramas de precipitações ocorridas no período considerado no estudo

(Fonte: informações pessoais do Sr. Luciano Sulzbach).

No conjunto de dados avaliados, o conteúdo de argila apresentou maiores interferências para as leguminosas em relação às gramíneas. Considerando anos de precipitações normais para a cultura da soja, observa-se consistência dos valores de correlação inversa com os teores de argila, onde os valores obtidos foram -0,39 e -0,40 para os anos de 2001 e 2003, respectivamente. Na figura 5 são apresentados os gráficos das correlações encontradas entre os teores de argila do solo e os dados de produtividade com seus respectivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ).



**Figura 5** - Relação entre os teores de argila do solo e as produtividades de Soja 2001(A); Milho 2002 (B); Soja 2003 (C); Trigo 2003(D); Soja 2004 (E); e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS.

A capacidade de retenção de água e o teor de água disponível para as plantas são propriedades do solo que apresentam estreita relação com a textura do solo, bem como, com o modo que esta textura varia espacialmente na área. Em estudo realizado na cultura do sorgo Shatar e Mcbratney (1999) encontraram que as limitações de produção ocorrem em locais onde o solo apresentava baixa retenção de água e onde o pH estava fora do intervalo ótimo. Logo, uma variação na distribuição espacial da disponibilidade de água para as plantas tenderia a influenciar na variabilidade espacial da produtividade. Esta possibilidade é refletida nos resultados obtidos por Stafford et al. (1996), nos quais a análise de influência do tipo de solo na variação da produtividade sugeriu que a propriedade física do solo mais provável de

exercer influência na produtividade é a distribuição do tamanho das partículas, que exerce um papel principal na determinação da água disponível para as plantas.

Aliado a este fato pode estar o ingresso no sistema plantio direto com a presença de camadas compactadas os chamados “pé de grade” que podem estar interferindo no bom desenvolvimento radicular das culturas e, conseqüentemente, afetando a produtividade. Sugere-se que estudos mais aprofundados sejam conduzidos para compreender as relações entre o incremento do teor de argila e o decréscimo de rendimento.

Correlações negativas também foram verificadas nos dados de pH onde as variações encontradas foram de -0,11 para soja 2003 a -0,34 para soja 2001 (Figuras 6). Percebe-se que aumento na correlação negativa do pH do solo com a produtividade de 2001 para 2003. Este fato pode ser atribuído aos altos valores de pH encontrados na área, os quais apresentavam-se fora dos níveis preconizados para se obter bom desenvolvimento das culturas. Tal diminuição nos índices de correlação, como nesse exemplo, remetem a conclusões de que quando os atributos químicos do solo tiverem em níveis preconizados para a expressão do potencial produtivo, sua correlação com a produtividade será minimizada e outros atributos passam a explicar a variabilidade na produção.

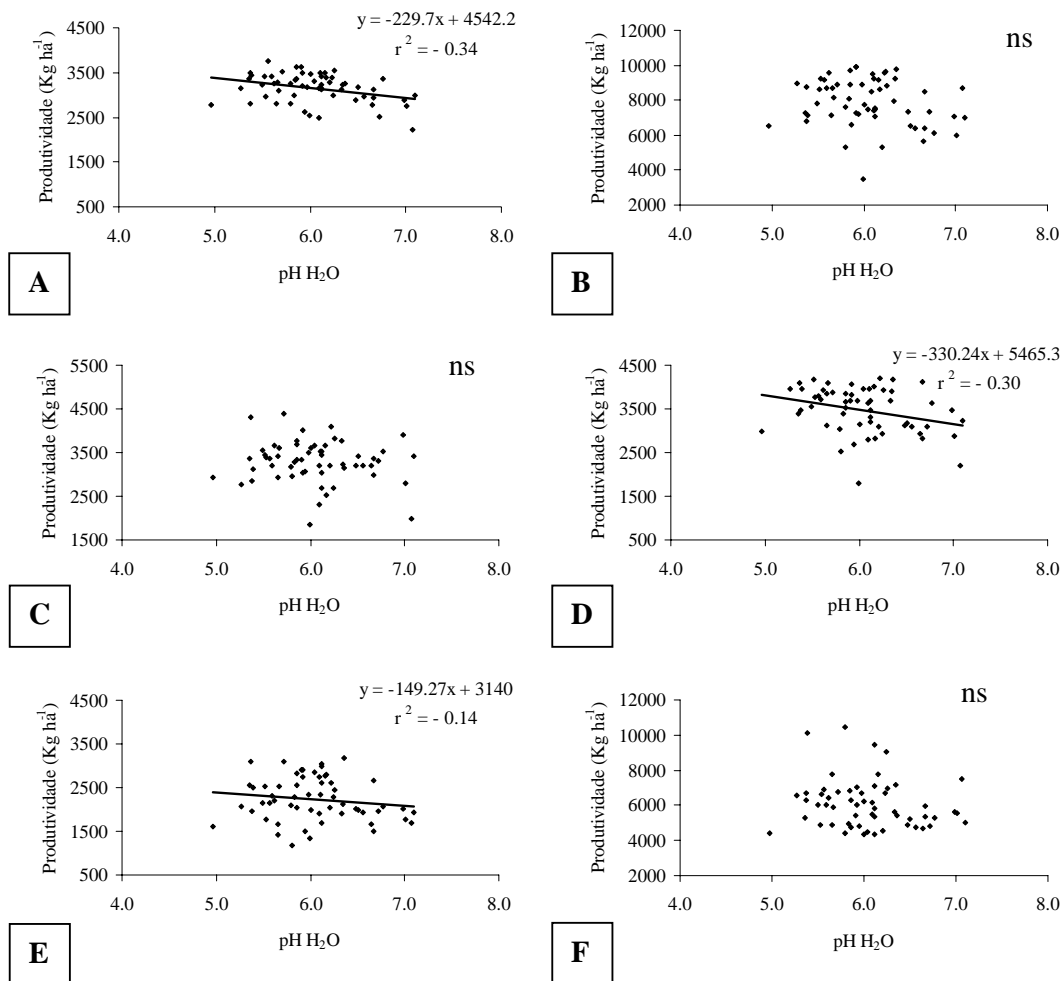
Outro fato que auxilia no entendimento das correlações negativas entre pH e produtividades pode ser atribuído a distribuição dos valores de pH encontrados na área, onde, segundo classificação da Comissão (2004), 48% dos pontos amostrados apresentavam pH alto. Nestes valores, foram observados oito pontos (14% da área) que apresentaram pH acima de 6,7 os quais coincidem com antigos depósitos temporários de calcário, comumente utilizados na região para facilitar as freqüentes operações de calagem realizada no modo convencional de cultivo (informação pessoal). Problemas de supercalagem tem sido referidos em outras lavouras sob sistema plantio direto no planalto. Este fato está associado a utilização de doses mais ajustadas ao sistema convencional do que sob sistema plantio direto. No sistema plantio direto o processo de reacidificação é mais lento permitindo que seja utilizada doses menores e mais espaçadas de corretivo.

Este fato reafirma as suspeitas de que muitos dos problemas hoje encontrados na condução das culturas no sistema de plantio direto sejam provenientes do “Manejo do Passado” ou a também chamada “Memória do solo”.

As práticas de manejo realizadas no planalto em geral e nesta propriedade em particular durante as décadas de 70 e 80 alicerçadas no sistema baseado em intenso preparo do solo e conseqüente processo erosivo, o trânsito de máquinas e a oxidação biológica da MO,



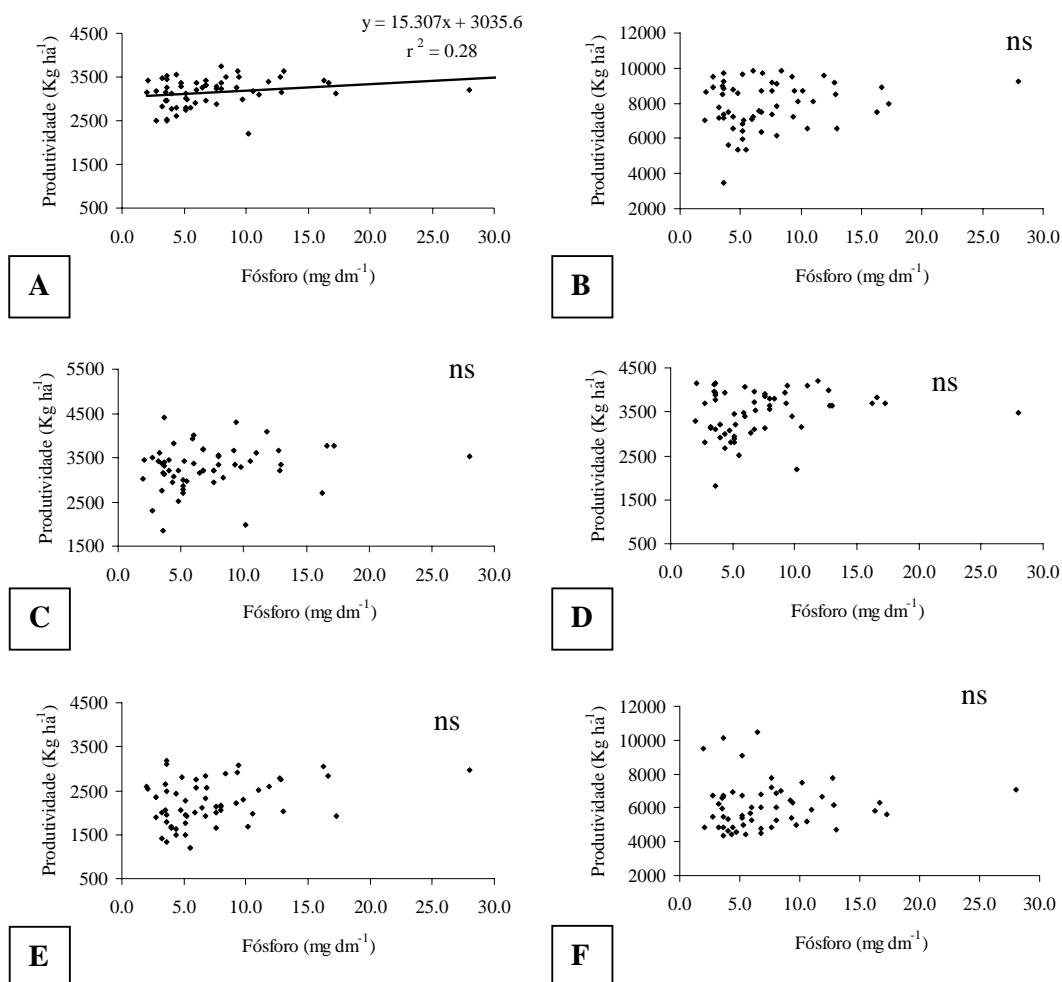
bem como o sistema de monocultura e pousio de inverno com baixa adição de resíduos, uso do fogo durante parte deste período, se refletiram em decréscimos nos teores de MOS reduzindo o potencial produtivo do solo (Mielniczuk, 2003).



**Figura 6** - Relação entre os teores de pH em H<sub>2</sub>O do solo e as produtividades de soja em 2001(A); Milho 2002 (B); Soja 2003 (C); Trigo 2003 (D); Soja 2004 (E) e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS.

Segundo Vezzani (2001) o solo é um sistema complexo, dinâmico e heterogêneo, onde sua qualidade é a expressão da interação entre os subsistemas minerais, plantas e organismos edáficos. O histórico de manejo pode conduzir, gradualmente, a uma melhoria da qualidade do solo agrícola até alcançar a excelência de qualidade. Assim como, em sentido oposto pode conduzir a um processo de regressão da qualidade até alcançar a degradação. Tais processos levaram às constatações de que, nesta lavoura, embora atualmente o nível de fertilidade do solo estivesse elevado, ainda se observa uma grande variação espacial no

rendimento de grãos das culturas, fato que pode estar relacionado a uma variabilidade espacial da qualidade do solo.



**Figura 7** - Relação entre os teores de Fósforo do solo e as produtividades de soja em 2001(A); Milho 2002 (B); Soja 2003 (C); Trigo 2003 (D); Soja 2004 (E) e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS.

Diferente do exposto até então, são as correlações obtidas com os dados de fósforo, onde apesar de modestas as correlações apresentaram-se positivas, com exceção do último ano avaliado que apresentou correlação inversa de  $-0,08$  a qual deve ser amenizada em função de uma situação severa de estresse hídrico (Figuras 7). Outro fato importante e que dever ser

considerado é a possibilidade de alterações nos padrões de fertilidade da área nos anos posteriores a amostragem em função da adubação fosfatada realizada na área.

Com relação aos valores de correlação positivos encontrados, podem ser decorrentes da distribuição dos teores de fósforo encontrado na área. Segundo os dados avaliados 30% dos pontos apresentaram teores de fósforo classificados como muito baixo (MB) e baixo (B) segundo a Comissão (2004) e 71% segundo Schlindwein (2003) caracterizando assim que este elemento pode ser uma das causas da variabilidade da produtividade encontrada nesta área. Considerando as correlações de rendimento da soja 2001 e milho 2002 período em que não houve modificação na formulação de fertilizantes, que possuíam maior concentração de K do que de P, neste cenário observou-se que a soja foi mais sensível do que o milho aos baixos teores de P.

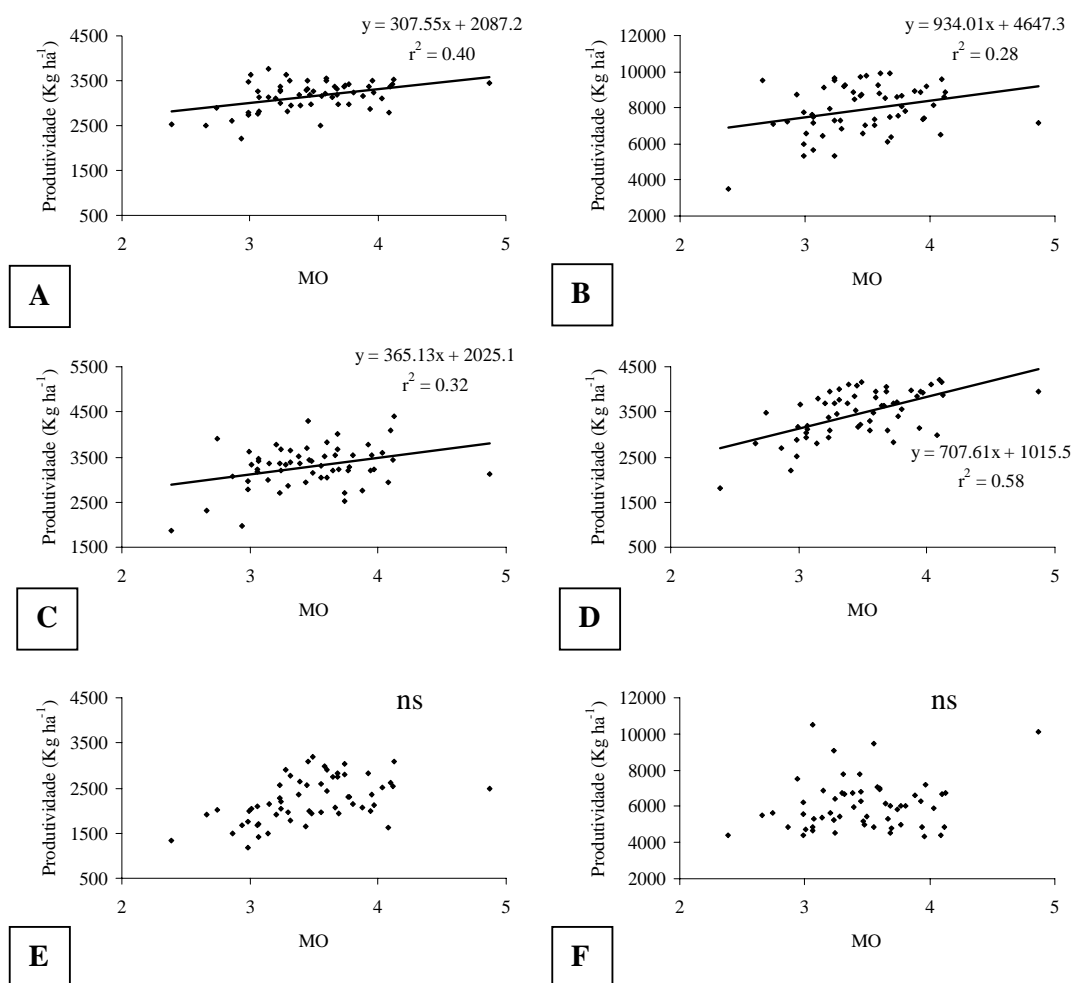
Para o potássio os baixos valores de correlação encontrados validam os altos teores deste nutriente encontrados no solo onde 90% dos pontos apresentaram classificação muito alto e 10% alto. Segundo a Comissão (2004), para o solo com CTC entre 5,1 e 15,0  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , o nível crítico é  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ , sendo o limite entre a classe médio e alto, ou seja, acima disso a probabilidade de resposta é muito baixa. Já segundo dados de Schlindwein (2003) que apresenta  $180 \text{ mg dm}^{-3}$  como nível crítico, a área apresenta 38% dos pontos nas classes baixa e média, com os demais pontos (62%) classificados como alto a muito alto.

Dentre os atributos de solo avaliados, a matéria orgânica (MO) foi o que apresentou os maiores índices de correlação, tendo valores de 0,58 e 0,49 para trigo 2003 e soja 2004 respectivamente (Figuras 8). Pela estreita relação apresentada entre a MO e a dinâmica do nitrogênio do solo, e devido à importância deste para as gramíneas, maiores correlações eram esperadas entre MO e as gramíneas, no entanto, encontrou-se valores consideráveis de correlação com a cultura o soja.

Dentre os atributos capazes de detectar alterações da qualidade do solo em função do manejo, a matéria orgânica do solo (MOS) tem sido apontada como um indicador chave. Segundo Mielniczuk (1999) a fundamentação para tal proposição deve-se, primeiramente, a sensibilidade desse atributo às práticas de manejo adotadas e a estreita relação da maioria dos outros atributos do solo e do ambiente com a MOS. Segundo relatos do Sr Luciano Sulzbach (proprietário da área), os locais com baixo conteúdo de MO coincidem com o local onde a alguns anos realizou-se o fechamento de uma grande voçoroca até então existente. Logo, as baixas concentrações de MO encontradas nestes locais ocorrem devido a inversão de horizontes durante o fechamento da referida voçoroca. Nesta prática, comumente ocorre raspagem superficial do solo (horizonte A) e exposição do horizonte sub-superficial

(horizonte B) o qual naturalmente apresenta concentrações de nutrientes e matéria orgânica inferiores aos encontrados na camada superficial.

De acordo com Burnett et al. (1985), embora a deficiência de nutrientes em solos erodidos possa ser corrigida pela aplicação de fertilizantes químicos, em geral, não é suficiente para restaurar o seu potencial produtivo. Carter et al. (1985) verificaram que a aplicação de fertilizantes contendo N, P, K, e Zn não proporcionou aumento significativo na produção de sete culturas em solos erodidos artificialmente. Nestas condições, a aplicação de adubo orgânico (esterco e resíduos de culturas) é a principal alternativa encontrada para a restauração da produtividade de solos erodidos pela substituição da perda de matéria orgânica da camada superficial (Larney & Jansen, 1996; Robbins et al. 1997).



**Figura 8** - Relação entre os teores de matéria orgânica do solo e as produtividades de soja em 2001 (A); Milho 2002 (B); soja em 2003 (C); Trigo 2003 (D); Soja 2004 (E) e Milho 2005 (F) – Palmeira das Missões, RS.

Os demais atributos avaliados e apresentados na Tabela 3 apresentam pouca expressão, mas com tendências lógicas como é o caso do Al, que apresentou correlações negativas em todas as culturas, o que era esperado pelas suas interferências no bom desenvolvimento das culturas quando presente no solo.

Quanto ao cálcio, as correlações variaram de negativa, para o primeiro ano, a positiva nos demais, porém, com pouca expressão de indicar alguma relação mais consistente de causa e efeito. O valor negativo obtido para o primeiro cultivo pode estar atrelado a recente aplicação de calcário na área. Esta suspeita é verificada observando os dados de magnésio que também apresentaram correlações negativas no primeiro ano. Assim, como o ocorrido para o cálcio, o magnésio apresentou pouca expressão na identificação das causas da variabilidade da produtividade, pois apresentou valores de correlação sem tendência alguma com vistas a elucidar variabilidade da produtividade obtida. Importante ressaltar que segundo classificação da Comissão (2004), cálcio e magnésio apresentaram 100% dos valores como altos. Este fato deve ser considerado em uma investigação mais profunda que tenha como foco principal o balanço nutricional do solo para avaliar se os altos valores apresentados em alguns nutrientes estejam causando desequilíbrio nutricional em outros.

A ausência de correlação entre a variação de atributos do solo e a variação na produtividade, como as obtidas para os dados analisados neste trabalho, tem sido registrada com frequência em trabalhos correlatos. Atestando esta afirmativa, Shatar & McBratney (1999), trabalhando também com dados coletados após a colheita, confirmaram que a verdadeira relação entre fósforo do solo e a produtividade de sorgo pode não ser identificável. Os autores usaram dados de produtividade de um único ano para identificar estas relações com vários atributos de solo e somente uma pequena fração da variação observada na produtividade pôde ser explicada por qualquer um dos fatores estudados. Stafford et al. (1996), analogamente, investigaram a relação entre a variação dos teores de nutrientes do solo e a variação na produtividade de um determinado ano, sem que fossem detectadas dependências significativas. Blackmore et al. (1999) também não encontraram evidência de qualquer nutriente de solo ou pH oriundos de levantamento em malha como fator limitante para o desenvolvimento da cultura. Em contrapartida, Mulla & Bhatti (1997) dividiram um campo em zonas de baixa, média e alta produtividade, as quais relacionaram-se com propriedades do solo, especialmente pH, matéria orgânica e teor de água disponível no solo. É importante salientar que um único mapeamento da produtividade foi considerado, e que os autores acreditam que por ser uma região de condição de cultivo com deficiência hídrica, os locais de baixa produtividade no campo podem exibir um padrão persistente de um ano para

outro. Ainda conforme Mulla & Bhatti (1997), geralmente as sub-regiões delimitadas por classes de produtividade associaram-se a diferentes posições no relevo. Além disso, teores mais reduzidos de fósforo foram associados com áreas de menor produtividade, que por sua vez localizavam-se em porções do terreno mais atingidas por processos erosivos, enquanto nas áreas de produtividade média e elevada não se verificaram diferenças significativas. Resultados similares foram obtidos por Li et al. (2001) os quais verificaram menores produtividades de algodão e menor absorção de nitrogênio em posições mais elevadas da paisagem, onde os solos exibiram maior suscetibilidade de perda de água e nutrientes por erosão hídrica.

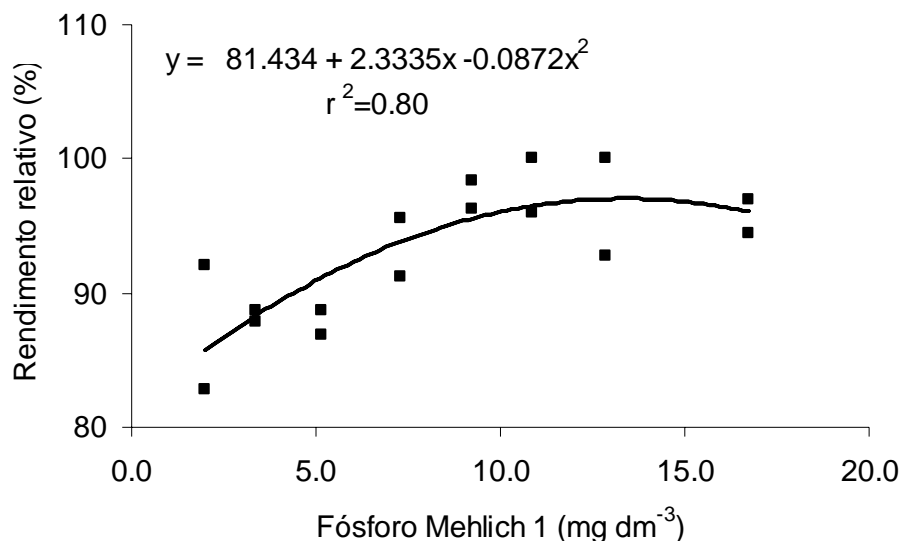
Quando se estudam dados de vários anos, aparentemente torna-se mais difícil estabelecer essas relações. Wendroth et al. (2001), também não encontraram associação espacial entre mapas de produtividade de grãos de três safras, mapas de índice de vegetação e mapas de índice de solo (que incluem diversos atributos de solo). A análise integrada dos atributos de solo e da produtividade, entretanto, poderia revelar algumas interações entre dois ou mais atributos, as quais poderiam eventualmente influir no comportamento da produtividade e exibir alguma relação com as sub-regiões encontradas.

Como exposto, a grande variabilidade encontrada nos atributos do solo e nos dados de produtividade, foram obtidas baixas correlações entre os mesmos. Optou-se então em trabalhar com dados médios, onde se relacionou as médias dos atributos nas diferentes classes com as médias de produtividade dentro de cada classe. A elaboração de equações (curvas de resposta das plantas) a partir das médias, elevaram significativamente os  $r^2$  das equações e apresentaram um comportamento biológico representando o comportamento das plantas diante dos atributos de solo.

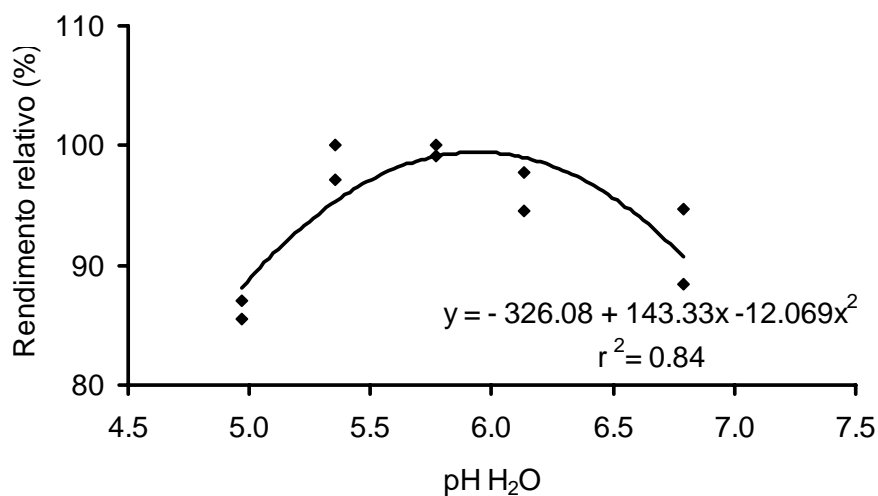
Nas Figuras 09, 10, e 11 são apresentadas as curvas obtidas através da metodologia proposta.

A partir da equação de resposta média da soja, é possível visualizar o teor no solo de máxima eficiência técnica (MET), ou seja, em torno de  $13,4 \text{ mg dm}^{-3}$  de P no solo. Este valor é muito importante, pois acima dele inicia um processo de decréscimo da produtividade. Assim, este é um indicativo claro de que esta reserva de nutrientes poderá ser esgotada sem risco de comprometer a produtividade futura. Comissão (2004), considera  $6 \text{ mg dm}^{-3}$  de P como nível crítico para o tipo de solo em estudo, sendo que acima deste valor a probabilidade de resposta é baixa. Em contrapartida Schindwein (2003) apresenta  $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , de modo que apresenta-se mais coerente com os dados obtidos no presente estudo. Neste trabalho, a soja está atingindo um rendimento relativo (RR) de 90% com o teor de  $4,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ,

considerado por vários autores (Mielniczuk et al. 1969 a, b; Siqueira et al. 1987; Comissão, 1989, 1995, 2004; Rajj et al. 1997; Schlindwein, 2003) como a máxima eficiência econômica (MEE).

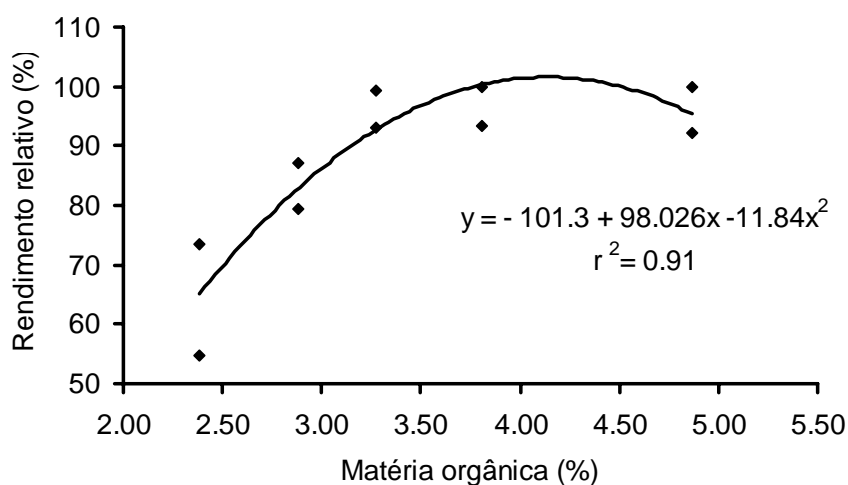


**Figura 09** – Curva de resposta média da soja em função do fósforo no solo, equação de resposta e  $r^2$  da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005.



**Figura 10** – Curva de resposta média da soja em função do pH no solo, equação de resposta e  $r^2$  da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005.

A partir da equação de resposta média da soja em relação ao pH no solo, a MET será atingida com pH de 5,9. Valores muito acima deste afetam negativamente o bom desempenho da cultura considerada. A Comissão (2004), recomenda correções de solo para cultivos anuais a partir do índice SMP, para atingir pH 5,5 ou 6,0 dependendo do sistema de cultivo adotado (direto ou convencional). A curva encontrada neste trabalho está de acordo com os dados da Comissão (2004), pois apresenta a MET entre estes valores de pH. Quanto a MEE para o pH foi de 5,0. Desta forma, para a área em estudo, níveis de pH entre 5,0 e 5,9 são apresentados como mais adequados para obter altas produtividades e bom retorno econômico sobre o corretivo aplicado.



**Figura 11** – Curva de resposta média da soja em função da matéria orgânica no solo, equação de resposta e  $r^2$  da equação, cultura da soja 2001 e 2003, UFSM 2005.

Segundo a curva de resposta da planta apresentada na Figura 12, teores de matéria orgânica (MO) no solo até 4,1 % (MET) proporcionaram acréscimos de produtividade. Já a MEE considerando 90% do RR, indicou teores médio de 3,2 % deste atributo no solo. A MO foi o atributo que apresentou o maior incremento na produtividade, sendo que com o menor valor atingiu um RR de 76% da MET.



## CONCLUSÕES

Na área estudada:

- Foi observada baixa correlação entre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas.
- A área apresentou em geral níveis elevados de fertilidade do solo, com excessão do fósforo. Para os atributos de solo com nível elevado não foi observada correlação significativa com o rendimento das culturas.
- Os teores de argila do solo apresentaram correlação negativa significativa com dados de produtividade das culturas. Este fato provavelmente está associado a existência de limitações de ordem física na área em estudo, as quais devem ser temas de futuras investigações de modo a elucidar esta correlação.
- A matéria orgânica apresentou as mais elevadas correlações significativas com os dados de produtividade das culturas em anos que apresentaram precipitações normais.
- A MEE obtido para P, pH e MO foi  $4,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ; 5,0 e 3,2% respectivamente. A MET para P, pH e MO encontradas no estudo são de :  $13,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ; 5,9 e 4,1% respectivamente. Valores acima destes, especialmente para pH, podem incorrer em decréscimos de produtividade .

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com recursos do Setor de Uso, Manejo e Conservação do Solo e da Água – UFSM, contando com apoio financeiro do CNPq, Fapergs, Manah e AGCO.

Agradecemos a Família Sulzback pela sua acolhida e apoio sempre que necessitada.

Agradecimento especial aos amigos Gentil Grappegia Junior (Junior), Evandro Spagnollo, Paulo César Conceição, Fabiane Vezzani, Marcelo Pedroso, Cláudio Lemanski, Ricardo Segnato, Gustavo Belle, Luciano Pes, Antônio Luis Santi, Ricardo Dellamea que através dos seus trabalhos de pós-doutorado, doutorado, mestrado, graduação e iniciação científica, forneceram a base de dados para a realização deste trabalho.

Agradecimento a João H. M. Viana pelo apoio nas análises estatísticas.

## LITERATURA CITADA

- BLACKMORE, S, GODWIN, R. J., TAYLOR, J. C., COSSER, N. D., WOOD, G. A., EARL, R., KNIGHT, S. Understanding variability in four fields in the United Kingdom. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.3-18.
- BLACKMORE, B. S.; GODWIN, R.; TAYLOR, J. C.; COSSER, N. D.; WOOD, G. A.; EARL, R. e KNIGHT, S. Understanding Variability in Four Fields in the United Kingdom. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, eds. P. C. Robert, R. H. Rust, D. J. Mulla and W. E. Larson. University of Minnesota, ASA, CSSA, SSSA, SEAFBS & ASPRS. 1998.
- BURNETT, E., STEWART, B.A. & B LACK, A. L. Regional effect of soil erosion on corn productivity – Gret plains. In Follet, R. F. & Stewart, B.A., eds. Soil erosion and crop productivity. American Society of Agronomy, 1985. p. 335-356.
- CARTER, D.L.; BERG, R.D & SANDERS, B.J. The effect of furrow irrigation erosion on crop productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:207-211, 1985.
- COELHO, A. M., DORAN, J. W., SCHEPERS, J. S. Irrigated corn yield as related to spatial variability of selected soil properties. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.441-52.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995. 224p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.

COX, S. M., WARDLAW, M. C. Grid soil sampling to determine manageable physical and chemical properties affecting soybean production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.327-33.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro,RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. – Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 1999.

JOHNSON, R. M., BRADOW, J. M., BAUER, P. J., SADLER, E. J. Spatial variability of cotton fiber yield and quality in relation to soil variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.487-97.

KHAKURAL, B. R., ROBERT, P. C., HUGGINS, D. R. Variability of corn/soybean yield and soil/landscape properties across a southwestern Minnesota Landscape. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.573-9.

KUHAR, J.E.(ed) *The precision-farming guide for agriculturists*. Moline, 1997. 117p.

LARK, R. M., STAFFORD, J. V., FROMENT, M.A. Exploratory analysis of yield maps of combinable crops. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings...* Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997b. p.887-94.

- LARNEY, F. J. & JANSEN, H.H. Restoring of productivity to a desurfaced soil with livestock manure, crop residue, and fertilizer amendments. *Agron. J.*, 88:921-927, 1996.
- LI, H. LASCANO, R. J., BOOKER, J., WILSON, L. T., BRONSON, K. F. Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil at a landscape scale. *Soil Till. Res.*, v.58, p.245-58, 2001.
- MARQUES JÚNIOR, J., CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, Anais... Lavras: Suprema. 1998, p.31-70.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. Métodos de análise do Laboratório de Análise de solo In: Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969a. 39p. (Boletim Técnico, 2).
- MIELNICZUK J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds) Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo – Ecossistemas Tropicais e Subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.01-08.
- MIELNICZUK, J.; Manejo do solo do Rio Grande do Sul: uma síntese histórica. In: VI CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO Ibiruba – RS 2003, 5-14, 95p.
- MULLA, D. J., BHATTI, A. U. An evaluation of indicator properties affecting spatial patterns in N and P requirements for winter wheat yield. In: Stafford, J. V. (ed.), PRECISION AGRICULTURE 97, EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings...* Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. p.145-53. 1997.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.L. Recomendação de adubação e de calagem para o estado de São Paulo.

- Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- ROBBINS, C. W.; MACKEI, B. E. & FREEBORN, L.L. Improving exposed subsoil with fertilizers and crop rotation. *Soil Sic. Am.* 61: 1221-1225, 1997.
- SCHLINDWEIN, J.A. Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto. Porto Alegre – UFRGS, 2003. 169f. Tese doutorado.
- SIQUEIRA, O.J.F de; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G. et al. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1987. 100p.
- SHATAR, M. T., MCBRATNEY, A. B. Empirical modeling of relationships between sorghum Yield and soil properties. *Precision Agriculture*, Kluwer Academic Publishers, v.1, p.249-76, 1999.
- STAFFORD, J. V., AMBLER, B., LARK, R. M., CATT, J. mapping and interpreting yield variation in cereal crops. *Comput. Electron. Agr.*, v.14, p.101-19, 1996.
- VEZZANI, F. M. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. 2001. Tese de doutorado. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- WENDROTH, O., JÜRCHIK, P., KERSEBAUN, K. C., REUTER, H., van KESSEL, C., NIELSEN, D. R. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes - four case studies. *Soil Till. Res.*, v.58, p.113-27, 2001.
- WHELAN, B. Moving to PA Management in the grains industry. Obtido em Janeiro de 2002 em <http://www.usyd.edu.au/su/acpa>. Australian Centre for Precision Agriculture.

ZHANG, M., HENDLEY, P., DROST, D., O'NEIL M., USTIN, S. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.1475-81.