



**UFSM**

**Dissertação de Mestrado**

---

---

***AGRICULTURA DE PRECISÃO EM ÁREAS IRRIGADAS  
COM PIVÔ CENTRAL NO RIO GRANDE DO SUL***

---

---

**CLAUDIO LUIZ LEMAINSKI**

**PPGEA**

**Santa Maria, RS, BRASIL  
2007**

**AGRICULTURA DE PRECISÃO EM ÁREAS IRRIGADAS COM PIVÔ  
CENTRAL NO RIO GRANDE DO SUL**

**por**

**CLAUDIO LUIZ LEMAINSKI**

**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 a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

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

**PPGEA**

**Santa Maria, RS - Brasil.  
2007**

**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

**AGRICULTURA DE PRECISÃO EM ÁREAS IRRIGADAS COM PIVÔ  
CENTRAL NO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por  
**Claudio Luiz Lemainski**

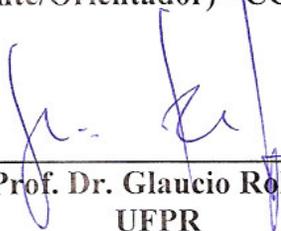
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



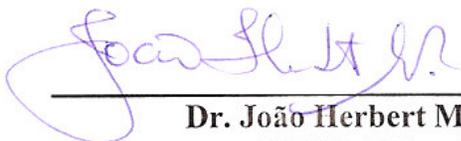
---

**Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado  
(Presidente/Orientador) - CCR - UFSM**



---

**Prof. Dr. Glaucio Roloff  
UFPR**



---

**Dr. João Herbert Moreira Viana  
EMBRAPA - CNPMS**

Santa Maria, 16 de fevereiro de 2007

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Mario Lemainski e

Geni Vitória Lemainski

Aos meus irmãos: Marcos Rogério Lemainski e

Liliani Elisa Lemainski

À minha namorada: Paula Fernanda Goergen

À essas pessoas maravilhosas para as quais devo tudo, em especial pela compreensão, apoio, incentivo constante e principalmente por me proporcionarem as condições necessárias para que este sonho se realizasse. Em especial os meus pais, os quais não se contentaram em dar-me a vida.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha existência e por iluminar e abençoar o meu caminho;

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização do mestrado;

À CAPES pelo auxílio financeiro para a conclusão desta dissertação;

Ao professor Telmo J. C. Amado, pela orientação, ensinamentos, conselhos e estímulo;

À Família Sulzbach, um agradecimento especial, pela atenção e disposição sempre oferecida junto à Granja São Bento em Palmeira das Missões, RS;

À Granja Bela Vista em Trindade do Sul, RS, em especial ao Fernando Picolli, pela disponibilidade e confiança depositada;

À AGROS – Acessoria Agrícola, pelo acompanhamento, compartilhamento de dados e experiências;

Aos amigos e colegas, Luciano Zucuni Pes (Pes), Ricardo Bergamo Schenato (Ricardinho), Gustavo Luiz Bellé (Guga), Ricardo Dellamea (Boneco), Ricardo Fulber (Alemão), Luciano Pizzuti (Oveia), Guilherme Londero, Ruberlei Dondé, José Alan Acosta, Douglas Rodrigo Kaiser (Kaiser), Clério Rickmam (Rickmen), Marta Rocha (Martinha), Vitor Girardello (Victor Hugo), Jardes Bragagnolo (Côco)..... um agradecimento em especial, pela colaboração nos trabalhos a campo, pelo companheirismo, pela amizade e pelos momentos de descontração;

Ao colega e amigo, Marcos Daniel Zancan, pela convivência;

À todas aquelas pessoas que colaboraram de formas distintas para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, permitindo-me obter os critérios necessários para avançar na execução deste trabalho, reitero meu mais sincero agradecimento.

*“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário”*

*Albert Einstein.*

## RESUMO

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

### AGRICULTURA DE PRECISÃO EM ÁREAS IRRIGADAS COM PIVÔ CENTRAL NO RIO GRANDE DO SUL

Autor: Claudio Luiz Lemainski  
Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado  
Local e data da defesa: Santa Maria, 15 de fevereiro de 2007.

A constante busca por tecnologias que permitam a potencialização do rendimento de áreas agrícolas fez com que a agricultura de precisão fosse adotada por um número crescente de agricultores no Brasil. A agricultura de precisão não é uma filosofia de manejo recente, entretanto somente nas últimas décadas está sendo implementada em seu completo contexto. No Rio Grande do Sul, a irrigação está presente em muitas propriedades agrícolas, as quais, por apresentar um sistema de produção diferenciado, carecem de informações ligadas à efetividade na aplicação de recursos e de seu retorno na forma de rentabilidade. Nessas propriedades, em especial, o conhecimento da variabilidade do solo e do rendimento é de grande importância para o sucesso da atividade. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi quantificar e avaliar a variabilidade existente nos atributos químicos do solo em área total; químicos e físicos, em zonas de rendimento estabelecidas e, por fim, analisar economicamente a rentabilidade que o sistema irrigado de produção proporciona, frente ao de sequeiro. O estudo foi conduzido em duas propriedades agrícolas comerciais, localizadas nos municípios de Trindade do Sul (TS) e Palmeira das Missões (PM), ambas no Rio Grande do Sul. As lavouras estudadas perfazem, respectivamente, 51,8 e 58,2 hectares irrigados com pivô central e 57,3 hectares de sequeiro, em PM. As amostragens para fins de caracterização foram realizadas na profundidade de 0-0,1 m, enquanto que para comparação das zonas de rendimento, foram nas profundidades de 0-0,05 0,05-0,1 e 0,1 0,2 m. Os dados de rendimento foram obtidos a partir de duas colhedoras (Massey Ferguson modelo MF 34 e CASE modelo 2388) as quais estavam equipadas com os sistemas Fieldstar® e AFS® de Agricultura de Precisão, respectivamente. As safras estudadas foram 2005/06 e 2006/06 na cultura do feijão, na área de TS, enquanto que em PM foram estudadas as safras 2002/03 e 2003/04 (irrigadas); 2001/2002 e 2004/05 (sequeiro) para a cultura do milho, sendo que, em ambas as áreas, o plantio direto é utilizado a mais de dez anos. Os dados de solo foram submetidos primeiramente à análise de estatística básica, dependência espacial e, posteriormente, à análise multivariada pelo método de componentes principais. Os rendimentos espacializados, após terem sido submetidos à análise de estatística básica, foram classificados para definição das zonas de rendimento (Baixa, Média e Alta). A variabilidade química do solo nas áreas estudadas comportou-se de maneira distinta. Em TS, 55,8% da área apresentou o pH abaixo de 5,4 enquanto em PM 100% da área apresentou com pH acima de 5,7. Em ambas as áreas os teores de potássio foram superiores a 118 mg dm<sup>-3</sup>. 7,1% da área apresentou teores de fósforo abaixo de 6 mg dm<sup>-3</sup> em TS, entretanto, na área de PM os teores encontrados foram superiores a 11 mg dm<sup>-3</sup>. O fósforo foi o atributo químico que apresentou dependência espacial com menor alcance obteve nas áreas estudadas. A análise multivariada revelou a existência de 6 e 4 componentes principais, os quais explicam 83 e 87% da variância total existente nas áreas de TS e PM, respectivamente. A avaliação física das zonas de diferentes rendimentos revelou que na área PM a zona de baixo rendimento apresentou a densidade de 1,42 g cm<sup>-3</sup>, macroporosidade de 8% na profundidade de 0,1-0,2 m, enquanto que a capacidade de água disponível na camada de 0-0,2 m foi de 32,4 mm. Os dados econômicos indicam que a área irrigada possui um ganho de rentabilidade na ordem de 19,7 % superior à lavoura cultivada em sequeiro.

Palavras-chave: agricultura de precisão, irrigação, manejo do solo, rentabilidade, variabilidade do solo.

## **ABSTRACT**

Master Dissertation  
Post-Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **PRECISION FARMING IN IRRIGATE CROPLAND BY CENTER PIVOT IN RIO GRANDE DO SUL STATE**

Author: Claudio Luiz Lemainski  
Adviser: Telmo Jorge Carneiro Amado  
Place and date of the defense: Santa Maria, February 15, 2007.

The search for new technologies that could increase crop yields encourages a growing number of Brazilian farms to use precision farming. Although precision farming principles are not new, only in last two decades has it been applied in a whole cycle in Brazil. The center pivot is increasing the area of implementation, although economic analysis is scarce. The knowledge of soil and yield variability is an important tool to achieve positive results in irrigated areas. The main objective of this work was to quantify the soil fertility indicators within the whole areas, and soil physics and soil fertility indicators within management zones, which were defined based on temporal yield maps. The net return of the irrigated area was compared to dry cropland in one farm. The work was carried out in two grain farms in Trindade do Sul in 51.8 ha and Palmeira das Missões in 57.3 ha. The soil is an Oxisol and the weather is cfa following Koeppen classification. The sampling in each management zone was in 0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 soil depth. The yield monitoring was done by Massey Ferguson MF 34 and CASE 2388 combines. The yields were monitored in 2005/06 and 2006/06 to black bean (*Phaseolus vulgaris*) in Trindade do Sul. In Palmeira das Missões the maize (*Zea mays*) were monitored in 2002/03 and 2003/04 (irrigated) and 2001/02 and 2004/05 (dry land). In both farms no-tillage system has been used for ten years. The soil data was analyzed by statistic, spatial variability and multivariate analysis. The yields were classified in low, medium, and high yield. The farms showed different soil indicators. In Trindade do Sul 55.8% of the area had pH water < 5.4, while in Palmeira das Missões 100% of the area had pH water > 5.7. The K, in both farms, had levels higher than 118 mg dm<sup>-3</sup>. 7.1% of area in Trindade do Sul showed the P lower than 6 mg dm<sup>-3</sup> and in Palmeira das Missões the P levels were higher than 11 mg dm<sup>-3</sup>. The P had the lower range among the nutrients investigated. The multiple analyses showed that 6 and 4 main components explained 83 and 87% of yield variation in Trindade do Sul and Palmeira das Missões, respectively. In Palmeira das Missões the soil physics indicators in each yield zones showed that lower yields were associated with bulk density of 1.42 g cm<sup>-3</sup>, macroporosity of 8% in 0.1 to 0.2 m depth, AWC of 32.4 mm. The economic analysis indicated that the irrigated area allowed 19.7% of increase in net return compared to dry land.

Key words: Agriculture precision, irrigation, management of soil, profitability, variability of soil.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

<b>Tabela 1</b> - Parâmetros estatísticos dos atributos químicos do solo avaliados na unidade de Trindade do Sul, RS.....	18
<b>Tabela 2</b> - Parâmetros estatísticos dos atributos químicos do solo avaliados na unidade de Palmeira das Missões, RS.....	18
<b>Tabela 3</b> - Interpretação de valores de pH em água, saturação da CTC por bases e as condições em que se encontra a área em estudo nos municípios de Trindade do Sul (TS), RS e em Palmeira das Missões (PM), RS.....	19
<b>Tabela 4</b> - Interpretação de valores de pH em água e as reais condições das áreas em % e as classes de fertilização nas áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	20
<b>Tabela 5</b> - Interpretação do teor de potássio conforme as classes de CTC do solo a pH 7,0 e as respectivas condições em que se encontram as áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	21
<b>Tabela 6</b> - Classe de disponibilidade de potássio, percentagem de ocorrência e a adequação da adubação realizada pela média das áreas nos municípios de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	22
<b>Tabela 7</b> - Interpretação de teores Argila (Comissão 2004), área em hectares e o percentual da área para as áreas de estudo de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	22
<b>Tabela 8</b> - Classe de argila e frequência de ocorrência expressa e hectares e em percentagem, para as áreas de estudo de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	23
<b>Tabela 9</b> - Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1, conforme o teor de argila e as respectivas condições em que se encontram as áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	23
<b>Tabela 10</b> - Interpretação dos teores de fósforo no solo, as reais condições das áreas em % e as classes de fertilização proposta nas áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	24
<b>Tabela 11</b> - Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados em Trindade do Sul, RS.....	25
<b>Tabela 12</b> - Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados em Palmeira das Missões, RS.....	27

<b>Tabela 13</b> – Análise de componentes principais das variáveis químicas do solo, altitude e a produtividade na área experimental de Trindade do Sul, RS.....	29
--	----

<b>Tabela 14</b> – Análise de componentes principais das variáveis químicas do solo, altitude e a produtividade na área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	32
---	----

## **CAPÍTULO II**

<b>Tabela 1</b> – Média de teores dos atributos químicos do solo e produtividade, avaliados nas zonas de rendimento em Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	59
---	----

<b>Tabela 2</b> – Média da produção de grãos, textura e densidade de partícula, avaliados nas zonas de rendimento em Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	66
---	----

<b>Tabelas 3</b> – Médias da produção de grãos, densidade e resistência à penetração, avaliados nas três zonas de rendimento em Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.....	68
---	----

<b>Tabela 4</b> – Médias de macroporosidade, microporosidade e produção de grãos, avaliados nas zonas de rendimento em Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	70
---	----

<b>Tabela 5</b> – Análise de componentes principais das variáveis químicas e físicas do solo, e da produtividade na área experimental de Trindade do Sul, RS.....	75
---	----

<b>Tabela 6</b> – Análise de componentes principais das variáveis químicas e físicas do solo, e da produtividade na área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	77
--	----

## **CAPÍTULO III**

<b>Tabela 1</b> - Parâmetros econômicos baseados na análise econômica das safras analisadas, para as áreas de estudo em de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	101
---	-----

<b>Tabela 2</b> - Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade em duas safras, ocorridas na área de estudo de Palmeira das Missões - RS.....	102
--	-----

<b>Tabela 3</b> – Classes de produtividade de milho safrão, área correspondente, e o número de pontos e rentabilidade média para área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	106
---	-----

<b>Tabela 4</b> - Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade, custos de produção e o rendimento de equilíbrio, em duas safras na área de estudo Palmeira das Missões, RS.....	108
---	-----

<b>Tabela 5</b> - Parâmetros econômicos médios, das safras analisadas, para as áreas de estudo em de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	109
---	-----

<b>Tabela 6</b> – Produtividade do milho, área correspondente, e a rentabilidade média real, para área experimental de sequeiro de Palmeira das Missões, RS.....	112
<b>Tabela 7</b> – Produtividade do milho, área correspondente, e a rentabilidade média real, para área experimental de sequeiro de Palmeira das Missões, RS.....	112
<b>Tabela 8</b> – Produtividade do milho, área correspondente, e a rentabilidade média real, para área experimental irrigada de Palmeira das Missões, RS.....	113
<b>Tabela 9</b> – Produtividade do milho, área correspondente, e a rentabilidade média real, para área experimental irrigada de Palmeira das Missões, RS.....	113

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

<b>Figura 1</b> – Mapa da localização das áreas experimentais (esquerda), e a vista aérea (direita), (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	10
<b>Figura 2</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental Trindade do Sul, RS.....	11
<b>Figura 3</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	11
<b>Figura 4</b> – Colhedora CASE 2388, equipada com Sistema AFS <sup>®</sup> (A), e colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar <sup>®</sup> (B).....	13
<b>Figura 5</b> – Quadrículas com demissões de 13 x 13 metros na área experimental (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	14
<b>Figura 6</b> – Detalhe da coleta das amostras de solo nos pontos georeferenciados, na profundidade de 0 a 0,1 m para as duas as áreas em estudo.....	14
<b>Figura 7</b> – Malha de amostragem das áreas de estudo com os pontos georeferenciados (A) Trindade do Sul - RS e (B) Palmeira das Missões – RS.....	15
<b>Figura 8</b> – Detalhe das telas, referentes ao programa Software CR-Campeiro6, ao serem manipulados dados químicos de solo.....	16
<b>Figura 9</b> – Relação entre altitude do terreno e teores de potássio nas áreas em estudo, de Trindade do Sul, RS e de Palmeira das Missões, RS.....	31

### CAPÍTULO II

<b>Figura 1</b> – Mapa da localização das áreas experimentais (esquerda), e a vista aérea (direita), (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	51
<b>Figura 2</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental Trindade do Sul, RS.....	52
<b>Figura 3</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	52
<b>Figura 4</b> – Colhedora CASE 2388, equipada com Sistema AFS <sup>®</sup> (A), e colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar <sup>®</sup> (B).....	54
<b>Figura 5</b> – Localização das zonas de rendimento e visualização dos pontos de rendimentos nas três zonas, nas áreas experimentais de (A) Trindade do Sul, RS e de (B) Palmeira das Missões, RS.....	55
<b>Figura 6</b> – Detalhe da coleta das amostras de solo nos pontos georeferenciados, na	

profundidade de 0 a 0,1 m para as duas as áreas em estudo.....	56
<b>Figura 7</b> – Relação entre o pH, alumínio, saturação por alumínio com o rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e o teor crítico proposto pela CQFS (2004), nas três zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	60
<b>Figura 8</b> – Relação entre saturação por bases, CTC efetiva, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e o respectivo teor crítico proposto pela CQFS (2004), nas três zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	62
<b>Figura 9</b> – Relação entre cálcio e magnésio, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e o respectivo teor crítico proposto pela CQFS (2004), nas três zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	63
<b>Figura 10</b> – Relação entre fósforo e potássio, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e os respectivos teores críticos propostos pela CQFS (2004) e Schindwein (2003), nas três zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	64
<b>Figura 11</b> – Histograma de distribuição da frequência nas três zonas de rendimento, das áreas experimentais, safra de feijão 2005/2006 (A) e safrinha 2006/06 (B) em Trindade do Sul, RS, milho 2002/03 (C) e 2003/2004 (D) em Palmeira das Missões, RS.....	65
<b>Figura 12</b> – Histograma da infiltração de água no solo e do escoamento superficial obtidos, através do Cornell Sprinkle Infiltrimeter nas zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	71
<b>Figura 13</b> – Curvas de retenção de água no solo para as três zonas de rendimento estudadas, na área experimental em Trindade do Sul, RS.....	72
<b>Figura 14</b> – Curvas de retenção de água no solo para as três zonas de rendimento estudadas, na área experimental em Palmeira das Missões, RS.....	73
<b>Figura 15</b> – Histograma da capacidade de armazenamento de água e a quantidade de água total disponível no solo, para as três zonas de rendimento estudadas na camada de 0-0,2 m, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	74
 <b><u>CAPÍTULO III</u></b>	
<b>Figura 1</b> – Mapa da localização das áreas experimentais (esquerda), e a vista aérea (direita), (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	96
<b>Figura 2</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo de sequeiro da área experimental Trindade do Sul, RS.....	97

<b>Figura 3</b> – Pluviogramas dos anos de cultivo irrigado da área experimental de Palmeira das Missões, RS.....	98
<b>Figura 4</b> – Colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar.....	99
<b>Figura 5</b> – Quadrículas com demissões de 13 x 13 metros na área experimental (A) Irrigado e, 14.5 x 14.5 metros na área de sequeiro (B), em Palmeira das Missões, RS.....	100
<b>Figura 6</b> – Histograma de distribuição da frequência da safra 2001/02 da cultura do milho, da área de sequeiro estudada em Palmeira das Missões, RS.....	104
<b>Figura 7</b> – Histograma de distribuição da frequência da safra 2004/05 da cultura do milho, da área de sequeiro estudada em Palmeira das Missões, RS.....	104
<b>Figura 8</b> – Histograma de distribuição da frequência da safra 2002/03 da cultura do milho, da área irrigada estudada em Palmeira das Missões, RS.....	105
<b>Figura 9</b> – Histograma de distribuição da frequência da safra 2003/04 da cultura do milho, da área irrigada estudada em Palmeira das Missões, RS.....	105
<b>Figura 10</b> – Histograma de distribuição de frequência das rentabilidades das safras de sequeiro e irrigada da cultura do milho, em Palmeira das Missões, RS.....	108
<b>Figuras 11</b> – Percentagem em relação ao rendimento de equilíbrio (RE) das safras (A) 2001/02 e (B) 2004/05 da área de sequeiro, Palmeira das Missões, RS.....	110
<b>Figuras 12</b> – Percentagem em relação ao rendimento de equilíbrio (RE) das safras (A) 2001/02 e (B) 2004/05 da área de sequeiro, Palmeira das Missões, RS.....	111

## LISTA DE ANEXOS

### CAPÍTULO I

<b>ANEXO A</b> – Áreas irrigadas por pivô central estudadas, (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	39
<b>ANEXO B</b> - Médias dos atributos químicos do solo, nas diferentes classes de altitudes em Trindade do Sul, RS.. .....	40
<b>ANEXO C</b> - Médias dos atributos químicos do solo, nas diferentes classes de altitudes em Palmeira das Missões, RS.....	40
<b>ANEXO D</b> – Mapas de atributos químicos de solo das áreas em estudo, (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.....	41

### CAPÍTULO II

<b>ANEXO A</b> – Detalhes do penetrômetro digital manual (marca DLG, modelo PNT 2000), utilizado na determinação da resistência a penetração nas as três zonas de rendimento estudadas, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	86
<b>ANEXO B</b> – Detalhes do Cornell Sprinkle Infiltrometer utilizado na determinação da infiltração e escoamento superficial de água para as três zonas de rendimento estudadas, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.....	87
<b>ANEXO C</b> – Parâmetros da equação de Van Genuchten, utilizados para o ajuste das curvas de retenção de água no solo das áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.....	88
<b>ANEXO D</b> – Limites superior e inferior de disponibilidade de água, capacidade de armazenamento de água às plantas no solo das áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.....	89
<b>ANEXO E</b> – Limites superior e inferior de disponibilidade de água, capacidade de armazenamento de água às plantas no solo das áreas experimentais de Palmeira das Missões, RS.	90

## SUMÁRIO

<b>1 . INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>2 . OBJETIVO GERAL</b> .....	3
<b>3 . HIPÓTESES</b> .....	4
<b>4 . CAPÍTULO I: Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em duas áreas irrigadas</b> .....	5
<b>Resumo</b> .....	5
<b>4.1 . Introdução</b> .....	6
<b>4.2 . Objetivos gerais</b> .....	8
<b>4.3 . Objetivos específicos</b> .....	8
<b>4.4 . Material e Métodos</b> .....	8
<b>4.4.1 . Área experimental</b> .....	8
<b>4.4.2 . Irrigações realizadas</b> .....	10
<b>4.4.3 . Dados de produtividade</b> .....	12
<b>4.4.3.1 . Coleta dos dados</b> .....	12
<b>4.4.3.2 . Tratamento dos dados</b> .....	13
<b>4.4.4 . Coleta das amostras de solo e determinações</b> .....	14
<b>4.4.5 . Tratamento dos dados</b> .....	16
<b>4.5 . Resultados e discussão</b> .....	17
<b>4.5.1 . Variabilidade de indicadores químicos</b> .....	17
<b>4.5.2 . Dependência espacial</b> .....	25
<b>4.5.3 . Análise multivariada</b> .....	27
<b>4.6 . Conclusões</b> .....	34
<b>4.7 . Referências bibliográficas</b> .....	35
<b>4.8 . Anexos</b> .....	39
<b>5 . CAPÍTULO II: Variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo nas zonas de rendimento, em áreas irrigadas</b> .....	45
<b>Resumo</b> .....	45
<b>5.1 . Introdução</b> .....	46
<b>5.2 . Objetivos gerais</b> .....	49
<b>5.3 . Objetivos específicos</b> .....	49
<b>5.4 . Material e Métodos</b> .....	49
<b>5.4.1 . Área experimental</b> .....	49

5.4.2 . Irrigações realizadas .....	51
5.4.3 . Dados de produtividade .....	53
5.4.3.1 . Coleta dos dados .....	53
5.4.3.2 . Tratamento dos dados .....	54
5.4.4 . Coleta das amostras de solo .....	55
5.4.5 . Análise e determinações do solo .....	56
5.5 . Resultados e discussão.....	58
5.5.1 . Indicadores químicos do solo .....	58
5.5.2 . Indicadores físicos do solo.....	65
5.5.3 . Análise multivariada .....	74
5.6 . Conclusões .....	79
5.7 . Referências bibliográficas.....	80
5.8 . Anexos .....	86
<b>6 . CAPÍTULO III: Variabilidade do rendimento e seu reflexo na rentabilidade de</b> <b>área irrigada e de sequeiro .....</b>	<b>92</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1 . Introdução .....</b>	<b>93</b>
<b>6.2 . Objetivos gerais .....</b>	<b>95</b>
<b>6.3 . Objetivos específicos.....</b>	<b>95</b>
<b>6.4. Material e Métodos.....</b>	<b>95</b>
<b>6.4.1 . Área experimental .....</b>	<b>95</b>
<b>6.4.2 . Irrigações realizadas .....</b>	<b>96</b>
<b>6.4.3 . Dados de produtividade .....</b>	<b>98</b>
<b>6.4.3.1 . Coleta dos dados .....</b>	<b>98</b>
<b>6.4.3.2 . Tratamento dos dados .....</b>	<b>99</b>
<b>6.4.4 . Dados econômicos.....</b>	<b>100</b>
<b>6.5 . Resultados e discussão.....</b>	<b>101</b>
<b>6.6 . Conclusões .....</b>	<b>115</b>
<b>6.7 . Referências bibliográficas.....</b>	<b>116</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A atividade agrícola tornou-se, através dos anos, uma importante atividade empresarial caracterizada pelo uso de agroquímicos, insumos, irrigação, entre outros, visando à obtenção de altas produtividades por unidade de área. O emprego intensivo de técnicas e tecnologias requer um gerenciamento cada vez mais sofisticado do sistema de produção.

A crescente expansão agrícola fez com que novas áreas fossem incorporadas ao sistema produtivo, permitindo o aumento horizontal da produtividade. Em muitas áreas e, em especial no sul do Brasil, o esgotamento da fronteira agrícola vem demandando a necessidade de aumentos verticais, tanto no rendimento como na rentabilidade das lavouras. Essa busca está despertando nos agricultores inovadores um crescente interesse no uso de novas tecnologias que potencializem a produtividade das áreas agrícolas. São exemplos de transformações do sistema produtivo de grãos no Sul do Brasil, nas duas últimas décadas, a adoção do sistema plantio direto, o uso da biotecnologia, a manutenção do solo permanentemente coberto com culturas de cobertura de inverno, o crescente uso de safra/safrinha, a mudança do espaçamento do milho e o uso de irrigação com pivô central.

As propriedades e/ou empresas agrícolas, a décadas se utilizam de fertilizações e correções a taxas uniformes. No entanto, essas nem sempre são eficientes para todas as subáreas do talhão, uma vez que são consideradas homogêneas ao longo da sua extensão. Sabe-se que a heterogeneidade existente pode ocasionar regiões de lavoura onde a exigência nutricional do cultivo não é atendida e regiões onde ocorre excesso de adubação, aumentando o risco de lixiviação de nutrientes aplicados em excesso e, assim, ocasionando o desperdício de recursos (Tschiedel & Ferreira, 2002).

Há alguns anos, pesquisas têm sinalizado e/ou considerado a variabilidade existente (as variações ocorridas) dentro da unidade de cultivo, buscando minimizar as variações através do gerenciamento localizado. Isso tem sido possível graças aos avanços das tecnologias, que possibilitaram o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo e a geração de mapas de rendimento georeferenciados. O conjunto dessas técnicas de georeferenciamento da produtividade vem sendo chamado de “Agricultura de Precisão”, na qual se preconiza aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos requeridas para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia disponível e os custos envolvidos o permitam (Dobermann & Ping, 2004).

A agricultura de precisão consiste em ferramentas de gerenciamento agrícola, cujo objetivo é aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas e subáreas agrícolas. As técnicas de agricultura de precisão devem ser compreendidas como um manejo que varia de local para local de forma sustentada, onde os desperdícios no uso de insumos são minimizados, contribuindo assim, para a redução dos danos ao ambiente, a partir da utilização da Agricultura de Precisão. Além de útil, a agricultura de precisão engloba a idéia de compromisso com o uso da terra, garantindo as boas condições de uso às gerações futuras. O conjunto de ferramentas surge como alternativa à agricultura convencional, na qual se busca manejar as áreas de forma diferenciada, através do monitoramento localizado das atividades. Uma das principais ferramentas desta técnica é o mapeamento de atributos do solo, o qual se correlaciona com a produtividade (Corá, 1997).

A variabilidade espacial encontrada na maioria dos solos pode estar relacionada a diversos fatores como a variação do material de origem, do clima, do relevo, de organismos, do tempo e/ou do efeito do manejo dos solos decorrentes do seu uso agrícola. Uma vez alteradas, as propriedades do solo pelo manejo inadequado, sejam elas a redução de matéria orgânica, o aumento da compactação localizada ou a diminuição da fertilidade, os reflexos se manifestarão com conseqüências muitas vezes negativas ao potencial produtivo, não sendo possível sustentar elevados rendimentos, especialmente em áreas irrigadas com pivô central, onde os cultivos são intensivos.

Nessas áreas, onde normalmente tem-se a produção altamente tecnificada, é fundamental o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos de solo, o que poderá contribuir para redução de custos e maximização da rentabilidade do sistema de produção. Os atributos do solo, após sofrerem alterações provocadas pelos processos erosivos e pelas atividades antrópicas, comportam-se de maneira bastante diferenciada ao longo da paisagem. Considerando essas variações e a dependência espacial dos atributos, a utilização de amostragem aleatória seria insuficiente para representar toda uma classe de solo ou de algum determinado atributo.

Áreas irrigadas, nas quais os cultivos são de maior freqüência, podem expressar, com o passar dos anos, aumento da variabilidade nos rendimentos. Isso ocorre porque são alterados os atributos químicos, físicos e biológicos do solo nas unidades de produção, através das irrigações realizadas ao longo dos cultivos e pela alta exportação de nutrientes. Em tais áreas, a intensa utilização do solo, associada à mecanização pesada em condições inadequadas de umidade do solo, pode induzir a ocorrência de alguns problemas. Nesse sentido, quanto

maior intervenção antrópica, maior heterogeneidade é causada, demandando um manejo localizado nas áreas.

A distribuição espacial de atributos físico-químicos do solo pode fornecer informações importantes na tomada de decisões, direcionando as intervenções de manejo onde a relação entre os atributos mostrar-se em condições desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas, comprometendo assim, a boa expressão do potencial produtivo das culturas.

Ao ocorrer variabilidade de rendimento, obtêm-se variações na rentabilidade do talhão cultivado. A diminuição dessa amplitude de variabilidade pode melhorar o retorno financeiro, uma vez que a eficiência na alocação de recursos produtivos constitui um objetivo natural de todo indivíduo ou empresa. Assim, áreas que possuem diferentes potenciais de rendimento, devido à heterogeneidade do solo, podem sinalizar a aplicação dos custos de forma variável, na tentativa de homogeneizar a produtividade e/ou reduzir custos, para conseqüentemente aumentar a rentabilidade da atividade. Ao mesmo tempo, tem-se o custo do sistema de irrigação, o qual é fixo, sendo necessários rendimentos homogêneos a fim de obter retorno financeiro do investimento realizado. Deste modo, não é aceitável a existência de subáreas com rendimentos abaixo do custo de produção, pois estarão drenando as receitas geradas nas demais subáreas.

Ao se considerar o objetivo dos irrigantes como sendo a minimização dos custos de produção e maximização dos retornos econômicos líquidos através do tempo, a análise econômica deve verificar se os bens e serviços resultantes dos cultivos justificam os investimentos feitos. Neste sentido, o rendimento não pode ser afetado pela variabilidade espacial e/ou por fatores de manejo do solo, sendo, então, necessário um monitoramento detalhado dos rendimentos que estão sendo obtidos, bem como das alterações que ocorrem nas propriedades do solo.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar as variabilidades existentes nos atributos físico-químicos do solo e dos rendimentos e analisar a rentabilidade econômica de áreas irrigadas com pivô central, comparada às não irrigadas.

### **3. HIPÓTESES**

- A irrigação diminui a variabilidade de rendimento na área, porém não a elimina, devido à intervenção antrópica, que induz o incremento na variabilidade espacial dos atributos do solo;
- A agricultura de precisão, devido ao gerenciamento georeferenciado que proporciona, é uma ferramenta que aumenta a eficiência de áreas sob pivô central.

## 4. CAPITULO I: VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM DUAS ÁREAS IRRIGADAS.

### Resumo

O conhecimento da variabilidade do solo é importante para o sucesso do sistema produtivo agrícola. A agricultura de precisão permite-nos integrar os conhecimentos agronômicos com as tecnologias de georeferenciamento, possibilitando um gerenciamento detalhado com informações espacialmente distribuídas na lavoura. Apesar de algumas lavouras aparentarem uniformidade, grandes variações de solo podem ocorrer. Essa variabilidade negligenciada pela agricultura tradicional, passa a ser fonte de informações importantes no planejamento de uma unidade agrícola. O cultivo das áreas agrícolas modifica a amplitude de variação de alguns atributos, especialmente em áreas irrigadas, o que pode contribuir para o aumento da variabilidade nos rendimentos. O objetivo desse trabalho foi de caracterizar, quantificar a variabilidade química do solo em áreas irrigadas e relacionar com os rendimentos obtidos. O estudo foi conduzido em duas lavouras comerciais do RS, nos municípios de Trindade do Sul (TS) e Palmeira das Missões (PM), nas quais as lavouras estudadas perfazem 52 (TS) e 57 (PM) hectares irrigados com pivô central. As informações de precipitação foram obtidas a partir dos históricos da Tractebel Energia S.A. (TS) e da propriedade (PM). A amostragem foi realizada na linha e entre linha com trado calador, a uma profundidade de 0-0,1 m com dez repetições por ponto georeferenciado. Foram quantificados quimicamente, os teores de Ca, Mg, P, K, CTC, Al, MO, saturação por Al, saturação por bases e os valores de pH e SMP para as duas áreas em estudo. Primeiramente, os dados foram submetidos à análise de estatística básica, após à análise de dependência espacial e posteriormente aplicou-se estatística multivariada, através do método de componentes principais. A estatística básica revelou que em TS, 55,8 % da área apresentou o pH abaixo de 5,4 enquanto que em PM, 100% da área estava com pH acima de 5,7. Os teores de potássio em ambas as áreas foram superiores a 118 g dm<sup>3</sup>, sendo os seus máximos de 295,11 e 278,45 g dm<sup>3</sup> para TS e PM, respectivamente. Quanto aos teores de fósforo, 7,1 % da área revelou-os abaixo de 6 g dm<sup>3</sup> em TS e já em PM, os teores encontrados foram superiores a 11 g dm<sup>3</sup>. A dependência espacial revelou que o fósforo foi o atributo químico de menor alcance nas áreas estudadas, diferente da argila, a qual apresentou maior alcance entre os atributos avaliados. A análise multivariada revelou a existência de 6 e 4 componentes principais, os quais explicam 83,25 e 87,0 % da variância total dos dados existentes nas áreas de TS e PM, respectivamente. Em TS, o primeiro componente explicou 36,25 % da variação total dos dados, apresentando correlações positivas para pH, Ca, Mg, saturação por bases e correlações negativas para saturação por alumínio. Entretanto, em PM o primeiro componente foi capaz de explicar 45,75 % da variação dos dados, compreendendo a argila, Mg, Ca, CTC efetiva, saturação por bases com índices de correlações positivas, e a altitude com correlação negativa.

Palavras-chave: variabilidade do solo; variabilidade de rendimento, irrigação; manejo do solo; análise multivariada; componentes principais.

## 4.1. Introdução

O objetivo da agricultura de precisão (AP) é combinar a aplicação de recursos e práticas agronômicas com atributos do solo e exigências da cultura, uma vez que os atributos variam espacialmente no campo. Trata-se de uma filosofia de gerenciamento agrícola que parte de informações precisas e completa-se com decisões, levando em conta o fato de que cada unidade agrícola tem propriedades diferentes Roza, (2000).

Estas ferramentas gerenciais combinam as novas tecnologias proporcionadas pela era da informação com uma agricultura empresarial madura. É um sistema de produção integrado, que tenta igualar o tipo e a quantidade de insumos que entram na propriedade com as necessidades da cultura em pequenas áreas dentro de um campo da propriedade. Esse gerenciamento não é novo, mas novas tecnologias agora disponíveis permitem que o conceito de AP seja percebido de forma prática no meio produtivo (Davis, et al 1998). A filosofia empregada na AP é aplicada a tópicos que se relacionam ao manejo preciso de pequenas unidades de lavouras, em contraste com o manejo tradicional, no qual um campo inteiro é compreendido como uniforme. Essa oportunidade de administrar pequenas áreas de lavouras individualmente ficou possível devido à disponibilidade de sistemas de posicionamento global, que podem ser usados para localização exata em terra de equipamentos e máquinas (Miller & Supalla, 1996).

Conforme Canzian et al. (1999), alguns campos podem ser bem uniformes, mas outros apresentam variações no tipo de solo, fertilidade e outros fatores que afetam a produção agrícola. Se a variabilidade do campo puder ser medida e registrada, estas informações poderão ser usadas para aperfeiçoar as aplicações em cada ponto da área cultivada.

Os solos tropicais naturalmente apresentam baixa fertilidade, sendo P particularmente o mais problemático, além de serem solos naturalmente ácidos. Com isso, para se tornarem aptos à produção, há necessidade da construção da fertilidade do solo, a qual não ocorre de forma uniforme em toda a lavoura, em função da interação dos insumos aplicados com as condições de solo, relevo, exportações, etc. A partir disso, especula-se a possibilidade de maior variabilidade espacial de atributos químicos em solos tropicais agrícolas que tiveram sua fertilidade construída, comparados a solos temperados que naturalmente são férteis. Este fato justificaria o desenvolvimento da AP em condições tropicais e subtropicais.

Blackmore (1996) considera que o manejo da variabilidade é a chave para o uso efetivo da tecnologia de AP. Blackmore et al. (1994) relataram que a AP é o termo que

descreve a meta de aumentar a eficiência do manejo de agricultura, sendo uma tecnologia em desenvolvimento, que modifica técnicas existentes e incorpora novas ferramentas para o administrador utilizar. Conforme Antuniassi (1998), o mapeamento detalhado dos fatores de produção e a aplicação localizada de insumos são os princípios básicos do sistema. Para Reetz & Fixen (1999), as tecnologias de AP sempre demandam ferramentas agrônomicas de produção mais desenvolvidas.

O conhecimento das propriedades e características do solo é de suma importância para o sucesso da agricultura. Pereira & Freire (1971) descreveram o solo como um corpo anisotrópico, sendo a anisotropia evidenciada na direção vertical, caracterizada pela diferenciação de camadas, denominadas horizontes. Não se tem, tradicionalmente, considerado a existência de variações das propriedades do solo dentro dos horizontes, embora o anisotropismo no solo seja há muito tempo reconhecido. Segundo Jenny (1941), as variabilidades espaciais das características dos solos podem estar relacionadas a diversos fatores, como variação do material de origem, clima, relevo, organismos e tempo e/ou a efeitos do manejo dos solos decorrentes do seu uso agrícola.

Berg & Klamt (1997) relatam que para solos fortemente intemperizados e bem drenados do Rio Grande do Sul, a variabilidade espacial a pequenas distâncias (<100 m) está relacionada, principalmente, à desuniformidade do seu manejo. Uma vez alterados os atributos do solo pelo manejo, os reflexos se manifestarão, em geral, na desestruturação, na compactação, na redução da permeabilidade e nos teores de matéria orgânica, sendo considerados as principais causas da degradação dos solos agrícolas, com conseqüências negativas no potencial produtivo das culturas comerciais.

Em áreas sob pivô central, onde os cultivos anuais são mais intensivos, é possível que as alterações ocorram com maior rapidez. Essas modificações podem originar-se do uso elevado de insumos e práticas inadequadas de manejo, a fim de atingir altos rendimentos dos híbridos cultivados. Outro fator que contribui nas alterações de variabilidade e na queda do rendimento é o aumento do trânsito de máquinas e equipamentos agrícolas, em condições inadequadas de umidade de solo.

A variabilidade dos atributos químicos de solo em áreas irrigadas ainda é pouco conhecida na maioria das propriedades do RS. Utilizando-se das ferramentas de AP, este trabalho tem por objetivo avaliar em duas áreas irrigadas, a variabilidade existente nos atributos químicos do solo, e correlacionar com os rendimentos de milho e feijão, obtidos em áreas irrigadas com pivô central.

## **4.2 Objetivos gerais**

Caracterizar a variabilidade espacial horizontal dos atributos químicos do solo em área irrigada.

## **4.3. Objetivos específicos**

- Identificar e quantificar a variabilidade existente dos atributos químicos do solo;
- Identificar os principais atributos químicos e físicos que determinaram o potencial produtivo das culturas comerciais nas áreas investigadas.

## **4.4. Material e métodos**

O estudo se realizou em duas áreas agrícolas comerciais irrigadas, situadas nos municípios de Trindade do Sul (RS) e Palmeira das Missões (RS), distantes entre si 80 km e ambas representativas da principal região produtora de grãos do RS.

### **4.4.1. Área experimental**

#### **➤ Trindade do Sul, RS**

O estudo foi realizado em uma lavoura comercial de 51,8 ha irrigados por pivô central pertencente à Granja Agrícola Bela Vista, localizada no norte do Estado do Rio Grande do Sul no município de Trindade do Sul, situada entre as coordenadas UTM 324.538 (W) a 325.038 (W), e 6.950.780 (S) a 6.950.780 (S), fuso 22 Sul, em uma altitude média de 614 m, usando datum WGS84.

Conforme a Embrapa (1999) essa região situa-se na zona da escarpa arenito-basáltica do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho

aluminoférrico, com elevados teores de argila. O sistema de manejo empregado, a aproximadamente onze anos, é o de plantio direto, com cultivo de cereais, soja, feijão e milho, no verão, e culturas de cobertura no inverno.

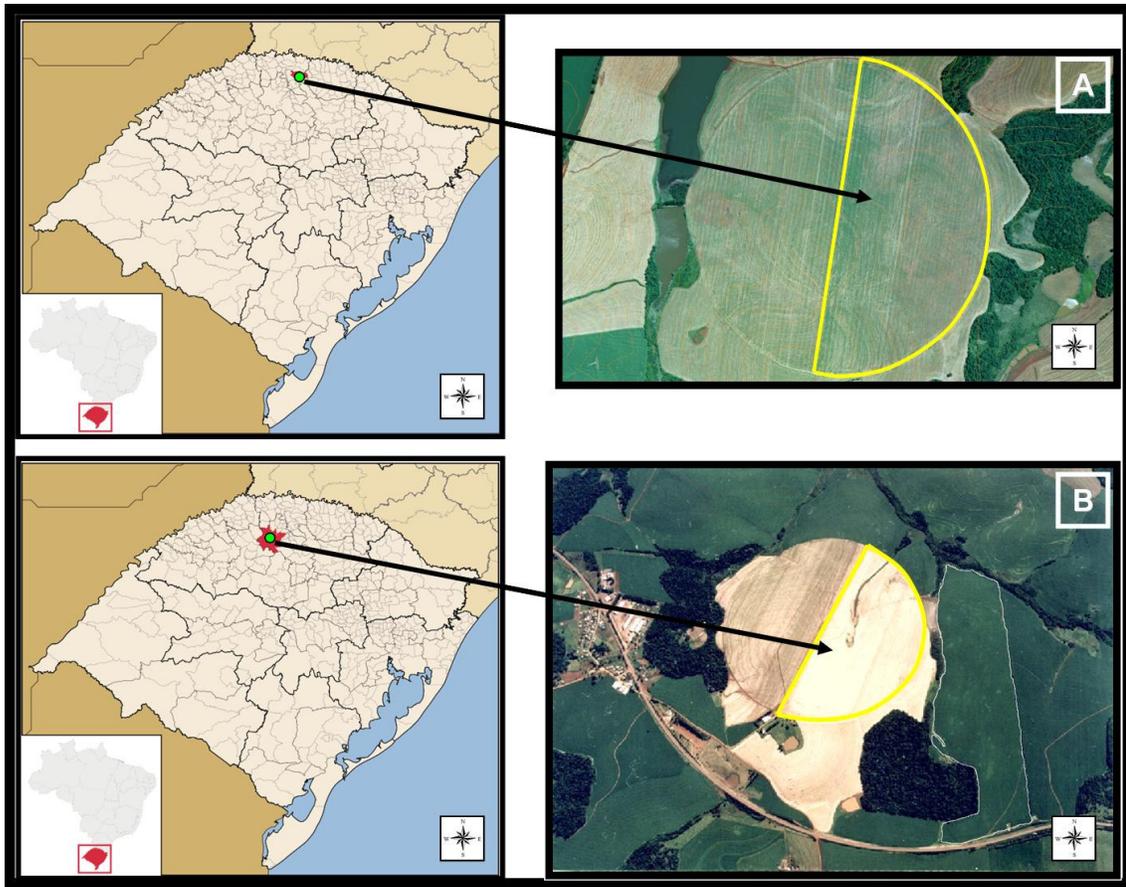
O clima da região, segundo a classificação de Köeppen é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média anual é de 18,7°C, máxima 39°C e mínima -5°C. A precipitação pluviométrica alcança 1618 mm ano<sup>-1</sup>.

#### ➤ **Palmeira das Missões, RS**

O presente estudo foi realizado em uma área comercial de 58,2 ha irrigados via pivô central, localizada no município de Palmeira das Missões - RS, km 15 da BR-468, situada entre as coordenadas UTM 262.517.3 (W) a 263.417.3 (W), e 6.919.887 (S) a 6.919.987 (S), fuso 22 Sul, numa altitude aproximada de 576 m, usando datum WGS84.

Conforme a Embrapa (1999), essa região situa-se na zona da escarpa arenito-basáltica do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 m e elevados teores de argila. O sistema de manejo empregado, a aproximadamente dez anos, é o de plantio direto, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno, e culturas da soja e do milho no verão.

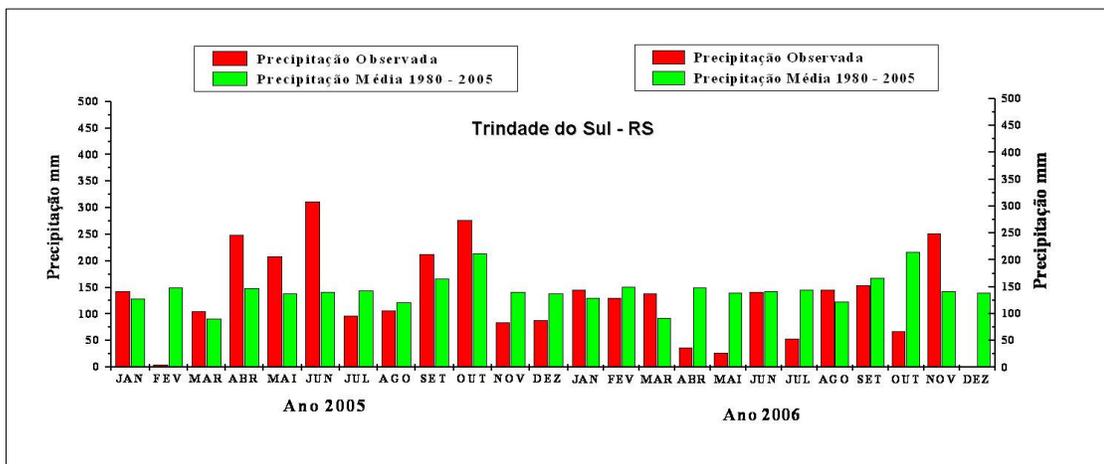
O clima da região, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média normal do mês mais quente do ano, janeiro, é de 24,6°C, enquanto que a do mês mais frio, junho, fica em 12,9°C. Quanto à média normal das máximas, esta é de 30,4°C, em janeiro e de 19,2°C, em junho. A média das temperaturas mínimas do mês mais quente, dezembro, é de 18,7 °C, e a do mês mais frio, junho, é de 9,3 °C. As chuvas são distribuídas regularmente em praticamente todos os meses do ano, sem estação seca definida, com precipitação oscilando entre 1.500 mm a 1.750 mm anuais.



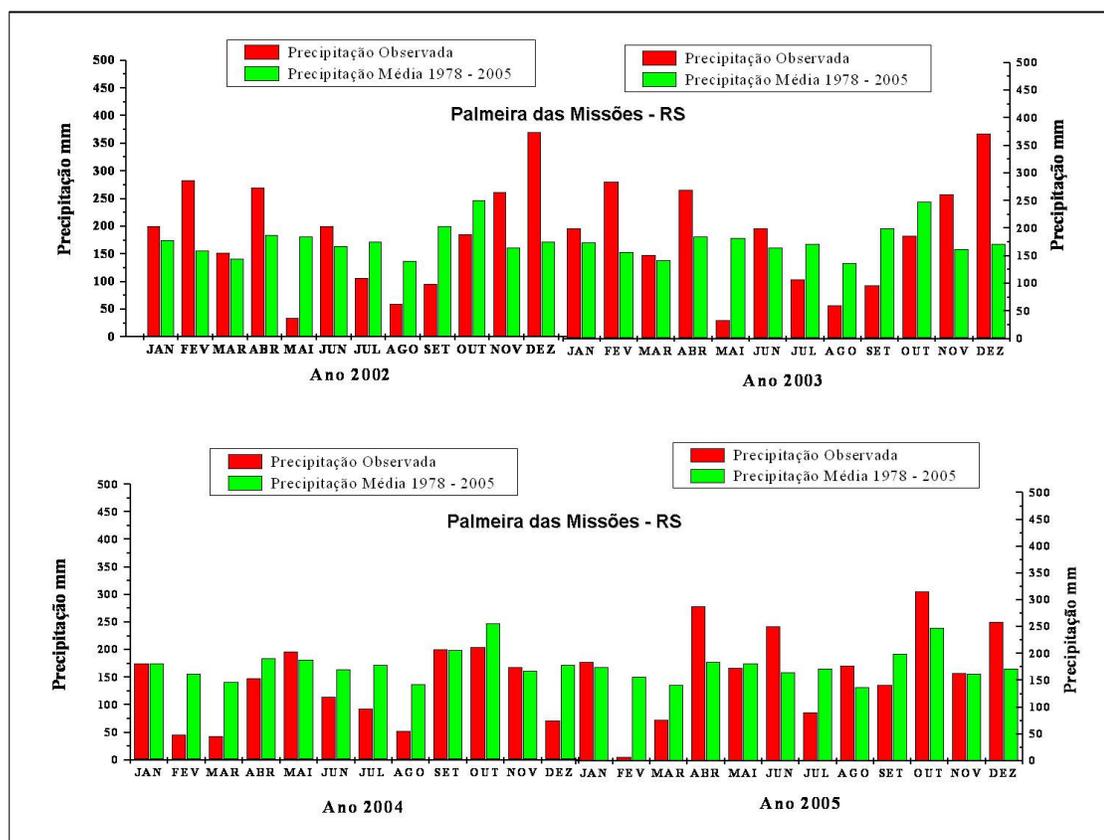
**Figura 1** – Mapa da localização das áreas experimentais (esquerda), e a vista aérea (direita). (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

#### 4.4.2. Irrigações realizadas

As lâminas de água aplicadas sobre as áreas obedeceram aos critérios adotados pelos proprietários das áreas, que observam as condições climáticas vigentes e as recomendações do fabricante do sistema de irrigação. As lâminas de irrigação complementar de 92,0 e 60,6 mm representam as quantidades totais fornecidas no ciclo do feijão, distribuídas em lâminas de 8,36 e 7,57 mm na área de TS, na safra 2005/06, e safrinha 2006/06, respectivamente. Já em PM, a cultura do milho, nas safras 2002/03 e 2003/04, recebeu 95,4 e 110,6 mm, os quais foram distribuídas em lâminas de 9,5 e 12,3 mm, respectivamente. As precipitações ocorridas no período estudado são apresentadas nas Figuras 2 e 3.



**Figura 2** – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Trindade do Sul, RS.



**Figura 3** – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.

### **4.4.3. Dados de produtividade**

#### **4.3.3.1 Coleta dos dados**

##### **➤ Trindade do Sul - RS**

Os dados de produtividade georeferenciados foram coletados na safra e na safrinha 2005/06 da cultura do feijão, através de uma colhedora CASE modelo 2388, equipada com Sistema AFS<sup>®</sup> (Advanced Farming Systems) de agricultura de precisão (Figura 4). Essa, congrega um conjunto de ferramentas como sensores de rendimento e umidade, cartão PC de armazenamento de dados ATA *flash* e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global – GPS marca Trimble<sup>®</sup>.

A tecnologia presente nesta colhedora 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. O erro estimado nos dados de rendimentos obtidos é inferior a 4 %. Além dessa ferramenta utilizada em tal 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 aplicações.

##### **➤ Palmeira das Missões – RS**

Dados de produtividade georeferenciados da cultura de milho foram obtidos nas safras 2003/04 e 2004/ 05, através de uma colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o sistema Fieldstar<sup>®</sup> de agricultura de precisão (Figura 2). Este congrega um conjunto de sensor de rendimento do tipo Micro-Track<sup>®</sup> de duas hastes, cartão para armazenamento de dados tipo PCMCIA e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global (GPS) da marca Garmin<sup>®</sup>. A tecnologia embarcada nessa colhedora permite que o usuário registre e armazene, em um determinado intervalo de tempo, a posição (latitude, longitude e altitude) da máquina e a quantidade de produção por unidade de área.

A colhedora utilizada nesta pesquisa não estava equipada com sensor de umidade de grãos, então a correção desse fator necessitou em tratar cada carga como um arquivo individual no sistema de armazenamento dos dados. Após a colheita do volume de grãos

correspondente a cada carga, o volume era pesado e descarregado, com posterior retirada de amostra de grãos para determinação de umidade e impurezas. Essas últimas foram corrigidas, obtendo-se, assim, dados de produtividade com elevado grau de confiabilidade, baseando-se na conferência do peso do produto registrado pela balança e o estimado pelo sistema da colhedora. Neste caso, o erro estimado é inferior a 2% segundo o proprietário (Sulzbach, 2006<sup>1</sup>). O sensor de rendimento de grãos era submetido à limpeza duas vezes ao dia (manhã e tarde). A velocidade de deslocamento da máquina foi mantida constante e, após cada descarga do tanque graneleiro, o ponto zero era conferido.



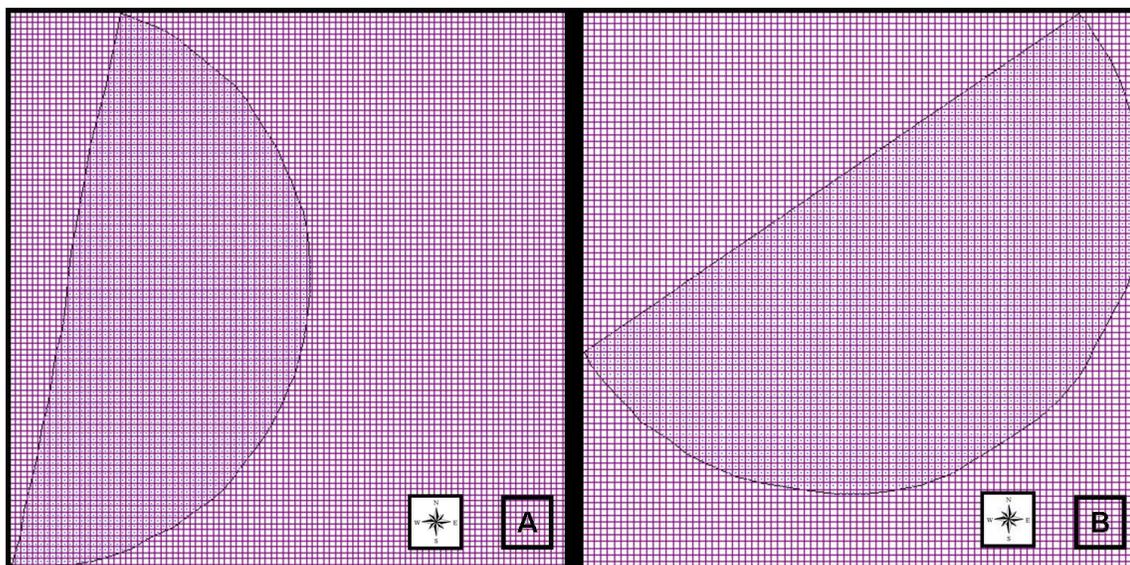
**Figura 4** – Colhedora CASE 2388, equipada com Sistema AFS<sup>®</sup> (A), e colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar<sup>®</sup> (B).

#### 4.4.3.2. Tratamento dos dados

Os dados georeferenciados de rendimento foram coletados com frequência de 1 e 2 segundos nas áreas de PM e TS, respectivamente, gerando uma malha de alta densidade de pontos. Os dados de colheita da área de TS foram submetidos a um processo de filtragem, a fim de identificar e eliminar eventuais erros (“outliers”), como proposto por Menegatti (2002). Após isso os dados de colheita (TS e PM) sofreram um processo de redução da densidade de pontos georeferenciados. As áreas mapeadas foram divididas em quadrículas (células) com dimensões de 13 x 13 m perfazendo uma área de aproximadamente 169 m<sup>2</sup> para ambas as áreas (Figura 3). A densidade final foi de aproximadamente 59 pontos de rendimento ha<sup>-1</sup>, totalizando 3.045 em TS e 3.466 para PM, os quais contêm informações de

<sup>1</sup> Comunicação pessoal

latitude, longitude e a massa de grãos. Os dados de produtividade de cada colheita passaram por análise de estatística exploratória, com o objetivo de verificar a amplitude da variação existente no rendimento das áreas estudadas.



**Figura 5** – Quadrículas com demissões de 13 x 13 metros na área experimental (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

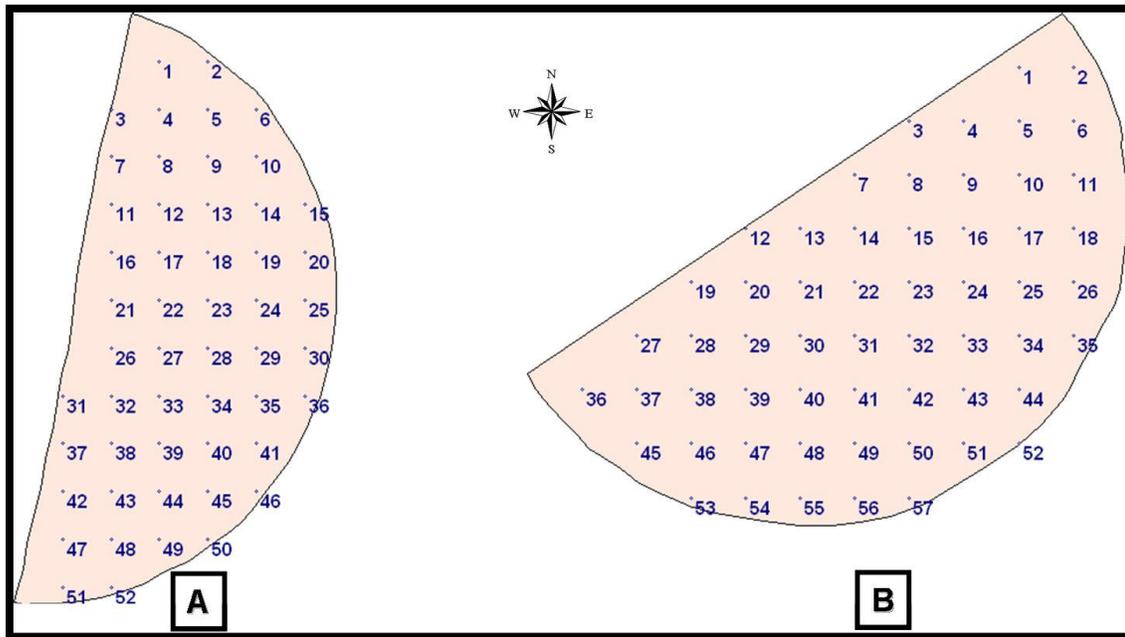
#### 4.4.4. Coleta das amostras de solo e determinações

As amostras de solo foram coletadas no segundo semestre de 2005, através de trado calador. Foram amostradas na linha e na entre linha de plantio, com 10 sub-amostras por ponto georeferenciado, a uma profundidade de 0 a 0,1 m.



**Figura 6** – Detalhe da coleta das amostras de solo nos pontos georeferenciados, na profundidade de 0 a 0,1 m para as duas as áreas em estudo.

Para a amostragem, foi utilizada uma malha regular de 100 X 100 metros, totalizando 52 e 57 pontos para as áreas experimentais de (A) Trindade do Sul, RS e (B), Palmeira das Missões, RS, respectivamente (Figura 7).



**Figura 7** – Malha de amostragem das áreas de estudo com os pontos georeferenciados (A) Trindade do Sul - RS e (B) Palmeira das Missões – RS.

As determinações foram realizadas segundo metodologias descritas por Tedesco et al. (1995) e Embrapa (1997). Os atributos químicos avaliados foram o pH em água (relação 1:1), o índice SMP, os teores de fósforo e de potássio, extraídos por Mehlich I (relação 1:10) e alumínio, cálcio e magnésio trocáveis, extraídos por KCl 1M. Também foi determinado o teor de argila das amostras, pelo método do densímetro. Foram realizadas três repetições de laboratório para cada amostra analisada e os procedimentos analíticos seguiram a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). A partir desses dados foram calculadas as somas de bases, a CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e a saturação por bases e por alumínio. O conteúdo de carbono orgânico foi determinado pelo método de combustão úmida, descrito por Nelson & Sommers (1986), com dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$  0,4N) e titulação com sulfato ferroso amoniacal, sendo os resultados expressos em teor de matéria orgânica.

#### 4.4.5. Tratamento dos dados

Inicialmente para cada atributo estudado, efetuou-se uma análise descritiva dos dados pela estatística clássica utilizando-se do programa Golden Software Grapher Version 3 (2000), com o objetivo de avaliar verificar a amplitude da variabilidade horizontal dos atributos avaliados. Para a verificação da dependência espacial optou-se pela construção dos semivariogramas experimentais para cada atributo de solo utilizando-se o programa Software Campeiro 6 – AV3 (Giotto, 2004), Figura 8. A análise multivariada foi realizada pelo método de componentes principais, o qual foi determinado pela sobreposição vetorial de modelos digitais utilizando matrizes de variância e covariância auxiliadas pelo programa CR-Campeiro5 (Giotto et al., 2004) e CR-Campeiro6 (versão não publicada).

Após isso, os dados foram interpolados através de técnicas de geoestatística, como a krigagem. O resultado foi um mapa digital, representando a variabilidade dos atributos químicos do solo nas áreas estudadas (anexo D).

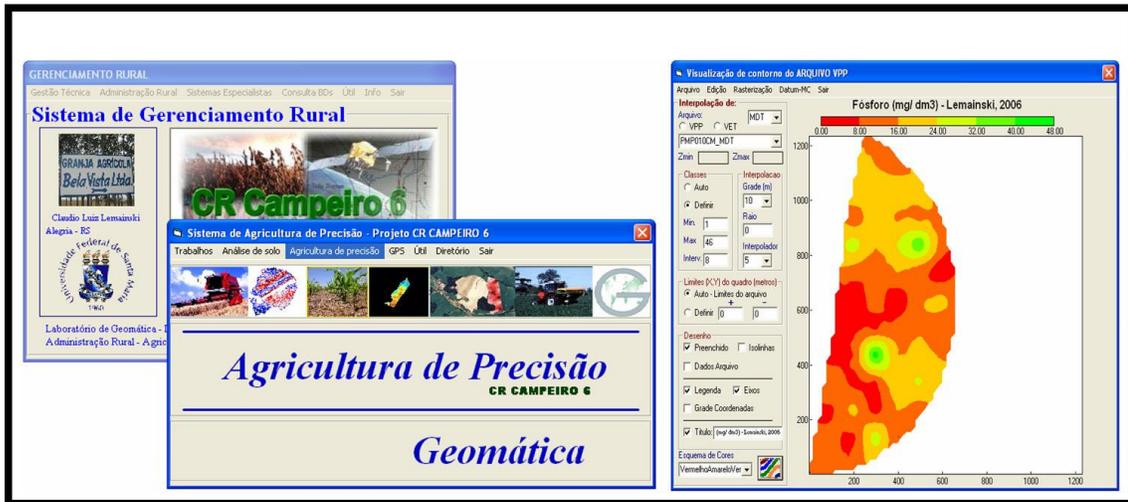


Figura 8 – Detalhe das telas, referentes ao programa Software CR-Campeiro6, ao serem manipulados dados químicos de solo.

## 4.5. Resultados e discussão

### 4.5.1 Variabilidade de indicadores químicos

Os resultados da análise da estatística descritiva dos atributos químicos de solo, avaliados nas duas propriedades, em Trindade do Sul (TS) e em Palmeira das Missões (PM), são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. De acordo com os valores de coeficiente de variação (CV), a variabilidade dos atributos pode ser classificada, segundo proposto por Warrick & Nielsen (1980) em baixa ( $CV < 12\%$ ), média ( $12 < CV < 62\%$ ) e alta ( $CV > 62\%$ ). Observa-se nas Tabelas 1 e 2, que nenhum atributo apresentou CV alto, enquanto que alumínio, cálcio, CTC efetiva, magnésio, potássio, saturação por alumínio %, saturação por bases % e argila, magnésio, fósforo e potássio enquadram-se na classificação média para as áreas de TS e PM, respectivamente. Já a classe baixa estão argila, matéria orgânica, pH e fósforo para a área de TS, e matéria orgânica, pH e saturação por bases para área de PM.

Essas amplitudes de valores revelam os possíveis problemas ao se fazer uso da média dos valores dos atributos como base para a tomada de decisões quanto à fertilização e/ou correção do solo. Ou seja, em alguns locais, a dose recomendada estará sub-dimensionada, em outros, adequada, ou ainda poderá ocorrer aplicação excessiva de determinados fertilizantes e/ou corretivos (Tabelas 5, 7, 11). Essa situação pode gerar prejuízos econômicos, tanto pela aplicação desnecessária, quanto pelo desequilíbrio entre as quantidades de nutrientes que serão disponibilizados à cultura, além da potencial contaminação que essa prática ocasiona no ambiente.

Avaliando as variações dos atributos de solo nas áreas experimentais, nota-se que, apesar de serem Latossolos, apresentam propriedades distintas. Confrontando os teores médios de alumínio, nota-se que no solo de PM não havia alumínio na camada de 0-0,1 m, enquanto que TS apresentou teores médios de  $0,88 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Essa situação é típica de áreas de atividade agrícola com predomínio de Latossolos, onde se realizou a aplicação de calcário na implantação do Sistema Plantio Direto (SPD), sendo necessária a reaplicação do corretivo.

Por causa dos solos com fertilidade natural baixa e acidez elevada, o suprimento de elementos essenciais pode não ser adequado para a obtenção de elevados rendimentos, e além disso, o aproveitamento da água do solo pode ser baixo, devido ao desenvolvimento das raízes concentrar-se na camada superficial, mais rica em nutrientes e matéria orgânica.

**Tabela 1** - Parâmetros estatísticos dos atributos químicos do solo avaliados na unidade de Trindade do Sul, RS.

Variável	Parâmetro estatístico						
	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio-padrão	CV %	Wilks-Shapiro <sup>(1)</sup>
Argila (%)	64,17	81,28	73,94	74,01	4,58	6,19	0,94*
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	4,84	5,93	5,46	5,42	0,28	5,22	0,95 <sup>ns</sup>
Fósforo (g dm <sup>-3</sup> )	1,00	45,50	13,15	14,43	8,98	62,23	0,92**
Potássio (g dm <sup>-3</sup> )	133,72	295,11	208,99	213,87	39,59	18,51	0,96 <sup>ns</sup>
Matéria Orgânica (%)	3,27	4,10	3,66	3,64	0,21	5,80	0,96 <sup>ns</sup>
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,26	1,74	0,87	0,88	0,38	43,27	0,96 <sup>ns</sup>
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,04	3,10	2,04	2,03	0,52	25,73	0,96 <sup>ns</sup>
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,65	6,89	4,56	4,59	0,95	20,62	0,98 <sup>ns</sup>
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,70	10,30	8,00	8,05	1,07	13,24	0,98 <sup>ns</sup>
Saturação por Al (%)	3,00	17,90	11,55	10,97	4,37	39,84	0,94**
Saturação por Bases (%)	44,00	75,60	60,30	59,22	7,37	12,44	0,97 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup> Teste de Wilks-Shapiro para distribuição normal, significativo em níveis de \*\*P ≤ 0,01 e \*P ≤ 0,05, ns = não significativo, respectivamente. Significativo indica que a hipótese para distribuição normal rejeitada.

**Tabela 2** - Parâmetros estatísticos dos atributos químicos do solo avaliados na unidade de Palmeira das Missões, RS.

Variável	Parâmetros estatísticos						
	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio-padrão	CV %	Wilks-Shapiro <sup>(1)</sup>
Argila (%)	50,05	84,07	61,07	61,83	7,73	12,50	0,95 *
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	5,75	6,75	6,26	6,27	0,25	4,03	0,96 <sup>ns</sup>
Fósforo (g dm <sup>-3</sup> )	11,31	23,75	15,00	15,86	3,57	22,48	0,90 **
Potássio (g dm <sup>-3</sup> )	118,82	278,45	191,37	186,89	30,50	15,94	0,96 <sup>ns</sup>
Matéria Orgânica (%)	2,20	3,40	3,00	3,01	0,25	8,40	0,94 <sup>ns</sup>
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,11	2,07	1,55	1,53	0,20	13,22	0,99 <sup>ns</sup>
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,68	7,56	5,93	6,00	0,68	11,28	0,97 <sup>ns</sup>
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,40	9,90	7,90	8,02	0,80	9,91	0,97 <sup>ns</sup>
Saturação por Al (%)	0	0	0	0	0	0	0
Saturação por Bases (%)	67,00	89,30	82,50	81,36	5,02	6,17	0,95 **

<sup>1</sup> Teste de Wilks-Shapiro para distribuição normal, significativo em níveis de \*\*P ≤ 0,01 e \*P ≤ 0,05, ns = não significativo, respectivamente. Significativo indica que a hipótese para distribuição normal e rejeitada.

O alumínio, além da paralisação do crescimento, causa engrossamento das raízes devido ao enrijecimento da parede e à inibição da divisão celular (Foy & Fleming, 1978; Foy et al., 1978), alterando a absorção e utilização de nutrientes, especialmente a do P (Canal &

Mielniczuk, 1983). Sá (1993) salientou que para, alcançar-se altos rendimentos, devem-se eliminar os fatores limitantes, como impedimento físico, níveis tóxicos de alumínio e carência em bases. O cultivo agrícola em solos ácidos exige a aplicação de corretivos, os quais ao elevarem o pH, neutralizam o efeito dos elementos tóxicos e fornecem cálcio e magnésio como nutrientes. Dessa maneira, a necessidade de aplicação de calcário na área de TS fica evidenciada, pois o valor médio de pH é de 5,42, enquanto que em PM, o valor médio do pH é de 6,27.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as interpretações de valores de pH em água e a saturação da CTC por bases, conforme a CQFS (2004). A área de TS encontra-se com 12,5 %, 43,3 %, 44,2 % e 0 % nas Classes Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M) e Alto (A) respectivamente, indicando a necessidade de calagem nas classes MB e B. Por outro lado, em PM, 0 %, 0 %, 14,4 % e 85,6 % enquadram-se nas Classes MB, B, M e A (CQFS, 2004), não apresentando necessidade de aplicação do corretivo.

**Tabela 3** - Interpretação de valores de pH em água, saturação da CTC por bases (CQFS, 2004), e a condição em que se encontram as áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul (TS), RS e Palmeira das Missões (PM), RS.

Interpretação	pH em água	Condição		Saturação por bases (CTC <sub>pH 7,0</sub> )	Condição	
		TS	PM		TS	PM
		---- % ----			---- % ----	
Muito Baixo	≤ 5,0	12,5	0	< 45	1,2	0
Baixo	5,1 – 5,4	43,3	0	45 – 64	78,6	0
Médio	5,5 - 6,0	44,2	14,4	65 – 80	20,2	31,1
Alto	> 6,0	0	85,6	> 80	0	68,9

O pH do solo influencia também as populações de microorganismos, responsáveis pela menor ou maior disponibilidade de alguns nutrientes; favorece ligações químicas e conversões de elementos químicos, o que vem a influenciar na disponibilidade dos mesmos (Malavolta, 1980; Rajj, 1991). Neste sentido, fica evidente que, em subáreas de TS, a recomendação da calagem torne-se uma prática importante para garantir melhores taxas de retorno econômico aos cultivos, em especial por apresentar irrigação com elevados investimentos.

A Tabela 4 destaca as condições em que se encontram as subáreas nos pivôs de TS e PM, com relação ao pH e à classe de correção recomendada pela CQFS (2004). A área de TS subestima muito em 12,5 % e pouco em 43,3 %, com relação à aplicação de corretivo na tentativa de uniformizar os valores de pH em torno da classe médio, em toda a área do pivô. Portanto, em apenas 44,2 % da área a aplicação está adequada e em 58,8% está subestimada. Já em PM, 14,4 % da área está sendo corrigida adequadamente, no entanto, em 85,6 % está superestimando a dosagem de aplicação do corretivo de acordo com a CQFS (2004).

**Tabela 4** - Interpretação de valores de pH em água (CQFS, 2004) e as reais condições das áreas em % e a classes de fertilização nas áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Condições da área e classes de correção				
Interpretação	Trindade do Sul – RS		Palmeira das Missões - RS	
	Condição Área	Classe correção	Condição Área	Classe correção
	--- % ---		--- % ---	
Muito Baixo	12,5	SBM	0	SBM
Baixo	43,3	SBP	0	SBP
Médio	44,2	A	14,4	A
Alto	0	SPP	85,6	SPP
Muito Alto	0	SPM	0	SPM

(SBM) – Subestima Muito, (SBP) – Subestima Pouco, (A) – Adequado, (SPP) – Superestima Pouco, (SPM) – Superestima Muito.

Com relação ao potássio, Tabela 5, observa-se que 17,8 % da área apresenta teores altos e 82,2 % encontra-se na classe muito alto na unidade de TS, enquanto que na área de PM 38,9 e 61,1 % dos pontos amostrados enquadram-se nas classes alto e muito alto, respectivamente, segundo classificação proposta por CQFS (2004). Estes dados vêm a confirmar que, na maioria das lavouras do RS, a disponibilidade de K é suficiente, embora ainda sejam observadas fórmulas mais concentradas em K<sub>2</sub>O, conforme relatou Silveira (2002). Isso ocorre devido à não observância das recomendações técnicas, à pressão comercial e pela dúvida em não se aplicar fertilizantes potássicos quando o solo apresentar níveis de K acima do nível de suficiência. Este fato pode sugerir a revisão dos parâmetros de

suficiência para potássio, pois em alguns trabalhos observa-se respostas à adubação, mesmo estando o solo com teores acima do nível de suficiência (Kist, 2005). Além disto, as leguminosas, como soja e feijão, são bastante exigentes em K e têm elevada exportação. Por outro lado, o potássio pode ser ciclado por culturas de cobertura e alternância de soja/milho.

**Tabela 5** - Interpretação do teor de potássio conforme as classes de CTC do solo a pH 7,0 (CQFS, 2004) e as respectivas condições em que se encontram as áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Interpretação	CTC <sub>pH 7,0</sub>		Condição da área*	
	----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----		TS	PM
	> 15,0	5,1 – 15,0		
	-----mg de K/dm <sup>3</sup> -----		----- % -----	
Muito Baixo	≤ 30	≤ 20	0	0
Baixo	31 – 60	21 – 40	0	0
Médio	61 - 90	41 – 60	0	0
Alto	91 - 180	61 – 120	17,8	38,9
Muito Alto	> 180	>120	82,2	61.1

\* (TS) Trindade do Sul, RS e (PM) Palmeira das Missões, RS.

Ainda Silveira (2002), em trabalho realizado num Latossolo com teores de K nas camadas 0 - 0,05 e 0,05 - 0,1 m de 172 e 112 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, observou aumento na produtividade de grãos com a aplicação de pequenas doses, em relação ao tratamento sem aplicação. Por isso torna-se difícil estabelecer a condição ideal de K no solo para assegurar a sua disponibilidade, já que ela depende das características mineralógicas dos solos (Bortoluzzi et al., 2005), razão da existência de diferentes respostas nos diferentes grupos de solos cultivados.

A Tabela 6 apresenta as condições em que se encontram as subáreas nos pivôs de TS e PM em relação aos teores de K, e a classe de fertilização recomendada pela CQFS (2004). Em TS, 17,8 % da área está sendo fertilizada adequadamente, e em 82,2 % está superestimando-se pouco a aplicação de K. Em relação à área de PM, estima-se que em 38,9 % há a fertilização adequada e em 61.1 % da área a fertilização está superestimada muito acima das doses recomendadas pela CQFS (2004).

**Tabela 6** - Classe de disponibilidade de potássio (CQFS, 2004), percentagem de ocorrência e adequação da adubação realizada pela média das áreas nos municípios de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Condições da área e classes de fertilização				
Classe de Disponibilidade	Trindade do Sul – RS		Palmeira das Missões - RS	
	Ocorrência --- % ---	Fertilização	Ocorrência --- % ---	Fertilização
Muito Baixo	-	SBM	-	SBM
Baixo	-	SBP	-	SBP
Médio	-	SB	-	SB
Alto	17,8	A	38,9	A
Muito Alto	82,2	SPM	61,1	SPM

<sup>(1)</sup> SBM – Subestima muito, SBP – Subestima pouco, A– Adequado, SPP– Superestima pouco, SPM– Superestima muito.

Analisando a variabilidade da argila, de acordo com as classes propostas pela CQFS (2004), percebe-se que 100 % da área enquadra-se na Classe 1 para a área de TS, enquanto que em PM, 41,4 % da área pertence à Classe 2 e 58,6 % à Classe 1. Ao subdividir as classes de argila em intervalos menores, é possível visualizar melhor a variabilidade existente nas duas áreas estudadas. Na Tabela 7, observa-se que a área de TS apresenta menor variação do conteúdo de argila em relação à área de PM.

**Tabela 7** - Interpretação de teores de Argila (CQFS, 2004), área em hectares e o percentual da área para as áreas de estudo de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Argila		Trindade do Sul		Palmeira das Missões	
Faixa	Classe	Área	Condição	Área	Condição
--- % ---		--- % ---	--- % ---	--- ha ---	---% ---
≤ 20	4	0	0	0	0
21 – 40	3	0	0	0	0
41 – 60	2	0	0	24	41,4
> 60	1	52	100	33	58,6

**Tabela 8** - Classe de argila (CQFS, 2004) e frequência de ocorrência expressa e hectares e em porcentagem, para as áreas de estudo de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Argila	Trindade do Sul		Palmeira das Missões	
	Ocorrência		Área	
Classe	---	---	---	---
---	ha	%	ha	%
41 – 50	0	0	0	0
51 – 60	0	0	29	45,3
61 – 70	16	30,8	20	42,1
71 – 80	34	65,4	7	10,5
> 80	2	3,8	1	2,1

A variabilidade da argila apresentada na Tabela 8 indica a possibilidade de haver variabilidade na disponibilidade de água as plantas, quando se efetua irrigações com uma lâmina fixa. Em TS, 69,2 % da área estudada apresentam teores maiores que 70 % de argila, enquanto que em PM, somente 12,6 % estão acima dos 70 % de argila.

Os teores de fósforo apresentaram maior variabilidade na área de TS, onde 7,1 % da área encontram-se abaixo da classe médio, enquanto que na área de PM nenhuma subárea estava nas abaixo da classe alta (Tabela 9), segundo CQFS, (2004). Ao mesmo tempo, os teores de fósforo em TS apresentaram-se acima do teor alto em 92,9 % da área estudada. Já na área de PM, 100 % da área encontra-se neste mesmo patamar.

**Tabela 9** - Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1 (CQFS, 2004), conforme o teor de argila e a respectivas condições em que se encontram as áreas em estudo no município de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Interpretação	Classe de solo conforme o teor de argila <sup>(1)</sup>		Condição da área	
	1	2	Trindade do Sul	Palmeira das Missões
	-----mg/dm <sup>3</sup> -----		---	---
			%	%
Muito Baixo	≤ 2,0	≤ 3,0	0,2	0
Baixo	2,1 – 4,0	3,1 – 6,0	1,8	0
Médio	4,1 - 6,0	6,1 – 9,0	5,1	0
Alto	6,1 - 12,0	9,1 – 18,0	31,4	36,8
Muito Alto	> 12,0	>18	61,5	63,2

<sup>(1)</sup> Teores de argila: classe 1 => 60 %; classe 2 = 60 a 41 %.

A variabilidade do fósforo encontrada pode ser atribuída aos fatores de formação do solo. Igual importância deve ser dada à ação antrópica, que contribui para o aumento da variabilidade, na qual o manejo tradicional da área desconsidera a variabilidade do teor de argila e outros atributos do solo. A Tabela 10 refere-se às condições em que se encontram as subáreas nos pivôs de TS e PM, em relação aos teores de P e à classe de fertilização recomendada pela CQFS (2004).

Em ambas as áreas verificou-se que a adubação, baseada na média dos teores críticos sugeridos pela CQFS, (2004), superestima a quantidade de nutriente a ser aplicado. Em PM, onde os teores de P eram mais elevados, a superestimação aproximou-se dos 7,1 % (4,2 ha), sendo superior a TS. Nesta última área foi observado que aproximadamente 3,7 ha da área necessitava de investimentos na construção dos teores, fato que seria negligenciado pela fertilização praticada pela média.

**Tabela 10** - Interpretação dos teores de fósforo no solo (CQFS, 2004), as reais condições das áreas em % e as classes de fertilização propostas nas áreas em estudo nos municípios de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Interpretação	Condições da área e classes de fertilização			
	Trindade do Sul – RS		Palmeira das Missões - RS	
	Condição Área	Classe <sup>(1)</sup> Fertilização	Condição Área	Classe <sup>(1)</sup> Fertilização
	--- % ---		--- % ---	
Muito Baixo	0,2	SBM	0	SBM
Baixo	1,8	SBP	0	SBP
Médio	5,1	SB	0	SB
Alto	31,4	A	36,8	A
Muito Alto	61,5	SPM	63,2	SPM

<sup>(1)</sup> (SBM) – Subestima Muito, (SBP) – Subestima Pouco, (A) – Adequado, (SPP) – Superestima Pouco, (SPM) – Superestima Muito. Adequado, corresponde à recomendação de adubação com base no teor crítico de P estabelecido pela CQFS (2004).

#### 4.5.2 Dependência espacial

A análise geoestatística indicou que nos atributos do solo, houve dependência espacial. Neste estudo, o grau de dependência espacial das variáveis foi avaliado através da porcentagem do efeito no patamar, segundo os níveis de classificação: forte quando o efeito pepita correspondente a um valor  $\leq 25\%$  do patamar, dependência espacial moderada, quando o efeito pepita corresponde a um valor  $> 25\%$  e  $\leq 75\%$ , e fraca quando  $> 75\%$  do patamar (Cambardella, et al. 1994).

O grau de dependência espacial dos semivariogramas ajustados é considerado forte para as variáveis argila, pH, Ca e Mg para área de TS, enquanto que os demais atributos são moderados. Na área de PM, os atributos tiveram uma dependência espacial moderada para pH e P, sendo todos os demais fortes (Tabelas 11 e 12).

**Tabela 11** - Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados em Trindade do Sul, RS.

Variável	Pepita <sup>(1)</sup>	Patamar <sup>(1)</sup>	Alcance <sup>(1)</sup>	Modelo <sup>(1)</sup>	Dependência espacial	
					IDE <sup>(1)</sup>	Classes
Argila (%)	2,431	21,008	510	Esférico	15	Forte
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	0,014	0,080	408	Esférico	18	Forte
P (g dm <sup>-3</sup> )	43,904	80,583	102	Exponencial	54	Moderada
K (g dm <sup>-3</sup> )	308,346	1567,245	408	Esférico	20	Forte
MO (%)	0,014	0,045	156	Esférico	32	Moderada
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,060	0,193	153	Esférico	31	Moderada
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,009	0,041	220	Esférico	22	Forte
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,183	0,896	459	Exponencial	20	Forte
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,223	0,595	204	Esférico	37	Moderada
SAT - Al (%)	13,861	54,279	480	Esférico	26	Moderada
SAT - Bases (%)	5,137	19,102	204	Esférico	27	Moderada

<sup>(1)</sup> Pepita: semivariância no ponto zero; Patamar: semivariância a um espaço maior que a distância do alcance; Alcance: distância após a qual os valores das propriedades não são espacialmente correlacionados; Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais: Esférico, Exponencial e Gaussiano. Dependência espacial IDE (forte  $\leq 25\%$ ; moderada 25 a 75%; fraca  $\geq 75\%$  a 100 e  $\geq 100$  efeito pepita puro); Cambardella, (1994).

Segundo Cambardella, (1994), os atributos que apresentaram forte dependência espacial são mais influenciados por propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia, enquanto que os que apresentaram fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, principalmente pelo manejo do solo. Portanto, nas duas áreas as

propriedades do solo e o manejo utilizado têm ampla influência sobre a dependência espacial dos principais atributos do solo, uma vez que, o tipo e o teor dos constituintes mineralógicos da fração argila determinam uma série de características físicas e químicas do solo, em especial nos Latossolos.

A partir dos semivariogramas, observa-se uma variação no alcance dos mesmos, os quais variaram de 102 a 510 m para a área de TS e de 220 a 561 m para PM, mostrando que a distância inter-amstral utilizada para o mapeamento dos atributos foi adequada para todos os atributos, com exceção do P (100 x 100 m). Nota-se que em ambas as áreas, o menor alcance foi observado na variável P, indicando que quando tal nutriente for prioritário na adubação, a malha de amostragem deverá ser mais densa, a fim de uma melhor representação da variação ocorrida na área amostrada.

Segundo Trangmar et al. (1985), o alcance define o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para interpolação por técnicas de krigagem. Assim, baixos valores de alcance podem influir na qualidade das estimativas, uma vez que poucos pontos são usados para realização da interpolação.

Os atributos do solo avaliados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial. Os teores de argila tiveram os maiores alcances, tanto na área de TS como na de PM, variando de 510 a 561 m, respectivamente. Já os teores de P e Mg apresentaram menores alcances, 102 e 220 m. A menor continuidade espacial dos teores de P pode ser atribuída aos fatores de formação e ao manejo do solo realizado ao longo dos anos.

Os parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da krigagem. A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem, pois, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa ou maior a confiança que se pode ter nessa estimativa (Isaaks & Srivastava, 1989).

A origem da dependência espacial nas áreas estudadas é semelhante. O comportamento dos atributos nas áreas investigadas se deve principalmente aos fatores de formação dos solos e o manejo realizado ao longo dos anos. O manejo do solo utilizado nas áreas ao longo do tempo, como aplicações de fertilizantes e corretivos, pode ter contribuído para o aumento do alcance de dependência espacial dos atributos químicos do solo.

**Tabela 12** - Parâmetros geoestatísticos dos principais atributos químicos do solo avaliados em Palmeira das Missões, RS.

Variável	Dependência espacial					
	Pepita <sup>(1)</sup>	Patamar <sup>(1)</sup>	Alcance <sup>(1)</sup>	Modelo <sup>(1)</sup>	IDE	Classes
Argila (%)	7,061	59,722	561	Esférico	12	Forte
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	0,016	0,064	385	Esférico	25	Moderada
P (g dm <sup>-3</sup> )	3,556	12,712	255	Esférico	28	Moderada
K (g dm <sup>-3</sup> )	183,346	930,037	416	Esférico	20	Forte
MO (%)	0,010	0,061	459	Esférico	16	Forte
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0	0	0	0	0	0
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,009	0,041	220	Esférico	22	Forte
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,082	0,459	488	Esférico	18	Forte
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,141	0,632	510	Exponencial	22	Forte
SAT - Al (%)	0	0	0	0	0	0
SAT - Bases (%)	5,832	25,166	510	Exponencial	23	Forte

<sup>(1)</sup> Pepita: semivariância a espaço zero; Patamar: semivariância a um espaço maior que a distância do alcance; Alcance: distância após a qual os valores das propriedades não são espacialmente correlacionados; Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais: Esférico, Exponencial e Gaussiano. Dependência espacial IDE (forte  $\leq 25\%$ ; moderada 25 a 75%; fraca  $\geq 75\%$  a 100 e  $\geq 100$  efeito pepita puro); Cambardella, 1994.

#### 4.5.3 Análise multivariada

Um estudo de componentes principais foi realizado a fim de identificar as principais fontes de variação no conjunto de dados observados. O principal objetivo desse processo foi reduzir o número de variáveis sem a perda de informações importantes.

Na Tabela 13, são apresentados os resultados dos componentes principais dos atributos do solo amostrados na área de TS. Entre esses resultados, é apresentada a porcentagem da variância total do conjunto dos dados, que pode ser explicada por cada componente principal resultante da análise.

O primeiro componente principal sempre explica a maior porção da variação desse conjunto original de dados. O segundo componente explica a segunda maior porção da variância e assim por diante. Quando o número de componentes é igual ao número de variáveis originais do estudo, 100 % da variância total dos dados são explicadas (Mardia et al., 1989; Fraisse et al., 2001). O critério utilizado para escolha dos componentes principais, que correspondem a uma nova variável formada pela transformação linear das variáveis

originais, foi o de manter aqueles que representassem uma porcentagem acumulada acima de 80 % da variância total dos dados originais, e somente esses componentes são apresentados nas Tabelas 13 para área de TS e 14 para PM.

Observando os resultados das Tabelas 13 e 14, evidencia-se a forte inter-relação entre as treze e onze variáveis estudadas nas áreas de TS e de PM, respectivamente. Tais variáveis foram capazes de explicar grande parte da variação (86,26 e 83,27 %) a partir de seis e quatro componentes principais para as áreas de TS e PM, respectivamente. A interpretação de cada componente principal é um aspecto importante nesse tipo de análise, a qual deve ser realizada por meio de conhecimentos agronômicos sobre as possíveis causas da variação observada, de maneira que as decisões sejam tomadas corretamente.

O primeiro componente principal representou cerca de 35,43 % da variação original dos dados da área de TS (Tabela 13). A variável que apresentou correlação negativa elevada nesse primeiro componente foi a saturação por alumínio, enquanto que pH, magnésio, cálcio e saturação por bases apresentaram elevadas correlações positivas. Esse novo componente pode ser interpretado como sendo parâmetros da acidez – disponibilidade de Ca, Mg e saturação por bases. É perceptível que em algumas subáreas o potencial produtivo está sendo influenciado pela presença de alumínio trocável.

O segundo componente principal engloba cerca de 14,60 % da variação total dos dados e pode ser chamado de potencial de fertilidade – disponibilidade de potássio e relevo. Ele apresenta elevada relação, mas com um menor número de variáveis originais do que o primeiro componente principal (Afifi & Clark, 1996). A contribuição positiva dessas duas variáveis sugere associação entre elas, com efeito da topografia sobre o teor de K. Essa nova variável pode ser caracterizada como a ocorrência de teores de K no solo em função das toposequências, indicando que os maiores teores de K localizam-se em pontos de maior elevação. Esse fato pode estar ligado aos fatores de formação do solo, os quais vão determinar as características desses solos.

Os resultados apresentados nos anexos B e C e Figura 9, mostram que à medida que se deslocam do topo em direção à parte mais baixa do terreno, os atributos químicos do solo diminuem seus teores para as duas áreas estudadas, salvo o potássio, que se comportou contrariamente aos demais. Estes resultados mostram, em geral, que as propriedades do solo variam no espaço segundo um arranjo definido por diferentes fatores (manejo, erosão, relevo, etc.) e que a variabilidade depende muito mais da posição e da forma da declividade do que do acaso.

**Tabela 13** – Análise de componentes principais das variáveis químicas do solo, altitude e produtividade na área experimental de Trindade do Sul, RS.

Componentes da variância	Componentes principais					
	1	2	3	4	5	6
Variância	4,61	1,90	1,70	1,23	0,93	0,85
Proporção (%)	35,43	14,60	13,07	9,45	7,15	6,53
Proporção acumulada (%)	35,43	50,03	63,10	72,55	79,70	86,23
Variáveis	Correlação com os componentes principais <sup>(1)</sup>					
Argila	- 0,38	0,07	<b>- 0,74</b>	- 0,23	0,12	- 0,13
pH H <sub>2</sub> O	<b>0,89</b>	0,15	- 0,15	- 0,18	- 0,11	0,12
Fósforo	- 0,10	- 0,12	0,56	- 0,17	<b>0,71</b>	- 0,23
Potássio	0,31	<b>0,72</b>	0,13	0,37	0,12	- 0,36
Matéria Orgânica	0,14	- 0,31	0,21	<b>0,78</b>	- 0,02	0,36
Alumínio	- 0,65	0,43	0,28	- 0,35	- 0,09	0,28
Magnésio	<b>0,84</b>	- 0,19	- 0,08	- 0,14	0,08	0,11
Cálcio	<b>0,87</b>	0,10	0,14	- 0,06	- 0,06	- 0,16
CTC – Efetiva	- 0,03	- 0,03	<b>0,76</b>	- 0,18	- 0,47	- 0,19
Saturação por Al	- <b>0,74</b>	0,49	0,09	- 0,05	- 0,01	0,33
Saturação por Bases	<b>0,82</b>	- 0,04	0,07	- 0,39	- 0,11	0,13
Altitude	0,34	<b>0,83</b>	- 0,18	0,20	- 0,05	- 0,07
Produtividade	0,56	0,31	0,16	- 0,10	0,36	0,48

<sup>(1)</sup> Números em negrito visam destacar as variáveis originais com elevadas correlações (> | 0,70 | \*) com os componentes principais.

\* Limite arbitrado por Castro, (2004) e adotado neste trabalho.

O terceiro componente principal retido pela análise explicou 13,07% da variação dos atributos, apresentando correlações negativas para a argila e positivas para a CTC. Esse componente pode ser chamado de potencial físico-químico do solo, pois à medida que aumenta o teor de argila, alteram-se as propriedades físicas e químicas do solo. Tal resultado sugere que a nova variável está relacionada com a capacidade de troca e/ou armazenamento de bases desse solo. Isso permite caracterizar essa nova variável como a capacidade de retenção de cátions, nas quais as áreas com maiores valores da variável são, provavelmente, menos férteis.

O quarto componente principal, chamado de qualidade do solo, cujo teor de matéria orgânica do solo (MOS) explica 9,45 % da variação total dos dados, apresentando somente correlação positiva elevada para matéria orgânica. Essa correlação pode estar associada à inativação do alumínio no complexo de troca do material orgânico. Segundo Conceição et al.

(2005), a MOS pode ser utilizada como indicadora da qualidade do solo (QS), pois intervém nas principais funções do mesmo. Esse atributo permite avaliar os sistemas de manejo, nos quais pequenas alterações no carbono orgânico total são detectadas, permitindo assim, que correções nos sistemas de manejo sejam prontamente adotadas antes que a QS seja impactada de forma severa.

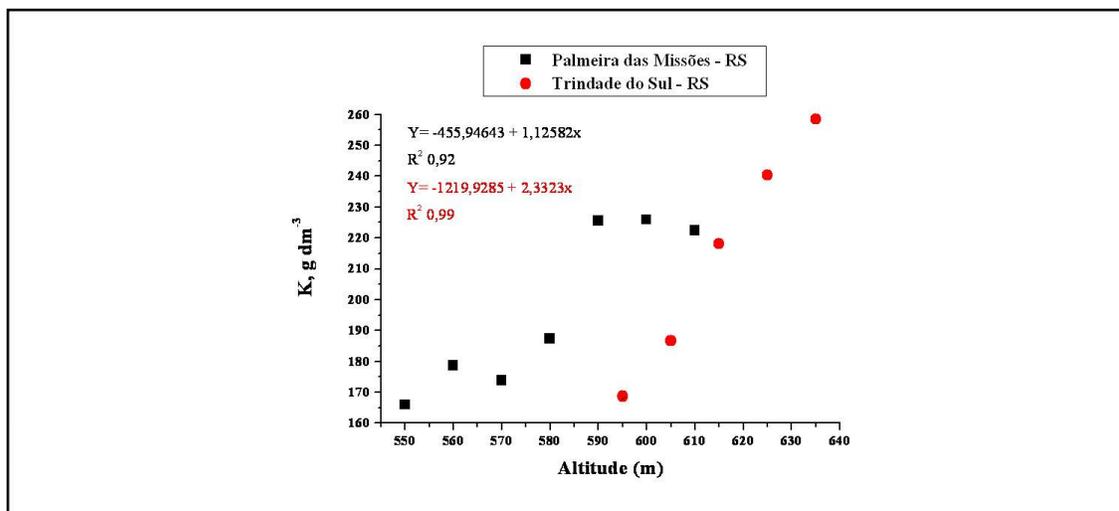
O quinto componente principal é o de potencial de fertilidade (disponibilidade de P) e representa 7,15 % da variação global dos dados. Nesse componente, somente o fósforo apresentou correlação elevada e positiva, o que sugere a forte influência e associação do P às variações de solo e às práticas de manejo adotadas.

Por fim, o sexto componente explica 6,53 % da variância total dos dados, não apresentando nenhuma correlação alta (acima de 70%) entre as variáveis usadas na análise.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da análise de componentes principais realizada nas variáveis químicas do solo na área de PM. Foram mantidos apenas quatro componentes principais dos onze existentes, cujas variâncias somadas explicam 83,37 % da variação total dos dados originais.

O primeiro componente é responsável por 43,55 % da variação total dos dados, e, devido à influência de muitas variáveis originais do estudo sobre componente, ele pode ser caracterizado como o potencial de fertilidade inerente ao solo. A maioria das correlações das variáveis originais nessa área com esse componente são positivas, com exceção da altitude. Isso sugere que solos em patamares mais baixos tendem a ser mais férteis. Ao mesmo tempo, nessa área o atributo do solo que possui maior influência sobre esse componente é o teor de argila, apresentando correlação positiva com o mesmo, concordando com a expectativa geral de que solos mais argilosos tendem a ser mais férteis.

No Rio Grande do Sul, a topografia das áreas influencia a dependência espacial dos solos. Dados altimétricos, gerados nas áreas estudadas (Anexo B e C), sugerem que os atributos de solo estão sendo influenciados pela variação topográfica existente (Figura 9).



**Figura 9** – Relação entre altitude do terreno e teores de potássio nas áreas em estudo, de Trindade do Sul, RS e de Palmeira das Missões, RS.

Estudos realizados por Souza et al. (2003) e Montanari et al. (2005) demonstram que as pedoformas côncavas apresentam maiores variações em atributos, como textura, teor de matéria orgânica e taxa de erosão e, quando comparadas à uma pedoforma linear, indicam que os atributos do solo apresentam comportamento diferenciado em função das formas do terreno.

Estudos desenvolvidos por Nizeyimana & Bicki (1992) revelaram que as formas de relevo côncavas apresentam maior variabilidade de densidade do solo, capacidade de troca catiônica e disponibilidade de fósforo se comparadas às pedoformas convexas. Além disso, esses autores observaram que a pedoforma côncava propicia aumento do conteúdo do carbono orgânico, da CTC, do conteúdo de argila, e diminui a densidade do solo e dos teores de areia. O aumento ocorre da meia encosta em direção ao sopé de deposição, comportamento esse atribuído às condições de drenagem e à inclinação do declive. Nos latossolos, com formas côncavas e convexas independentes do histórico de manejo, há mais variabilidade de atributos químicos e físicos do que em áreas de formas lineares (Souza et al., 2003; Souza et al., 2004).

Os locais da paisagem com classe de solo e manejo semelhantes, influenciados por formas de paisagem e declives diferenciados, apresentam variabilidade espacial das propriedades do solo, a qual está associada às variações do relevo. Desse modo, fica evidente a influência da topografia na variabilidade espacial das propriedades dos solos tanto na área de TS quanto em PM.

**Tabela 14** – Análise de componentes principais das variáveis químicas do solo, altitude e produtividade na área experimental de Palmeira das Missões, RS.

Componentes da variância	Componentes principais			
	1	2	3	4
Variância	4,79	1,87	1,60	0,91
Proporção (%)	45,55	17,00	14,55	8,27
Proporção acumulada (%)	43,55	60,55	76,10	83,37
Variáveis	Correlação com os componentes principais <sup>(1)</sup>			
Argila	<b>0,81</b>	- 0,13	- 0,16	0,26
pH H <sub>2</sub> O	0,51	<b>0,77</b>	0,05	- 0,32
Fósforo	- 0,25	- 0,32	<b>0,76</b>	0,04
Potássio	- 0,64	- 0,11	0,54	- 0,20
Matéria Orgânica	- 0,38	0,59	0,31	0,43
Alumínio	0	0	0	0
Magnésio	<b>0,77</b>	- 0,03	0,39	- 0,22
Cálcio	<b>0,82</b>	- 0,31	0,32	0,18
CTC – Efetiva	<b>0,83</b>	- 0,26	0,43	0,09
Saturação por Al	0	0	0	0
Saturação por Bases	<b>0,73</b>	0,59	0,19	- 0,26
Altitude	- <b>0,78</b>	- 0,02	0,24	- 0,40
Produtividade	- 0,39	0,53	0,28	0,46

<sup>(1)</sup> Números em negrito destacam as variáveis originais com elevadas correlações (> |0,70|) com os componentes principais.

\* Limite arbitrado por Castro, (2004) e adotado neste trabalho.

O segundo componente, o qual explica 17,00 % da variância total dos dados, apresentou correlação positiva somente com o pH. No entanto, algumas correlações como a matéria orgânica e a saturação por bases aproximam-se do índice limite (0,70), o que sugere a relação deste componente com a CTC do solo.

O terceiro componente principal detectado pela análise explicou 14,55 % da variação dos dados, nos quais somente o fósforo apresentou correlação elevada e positiva com as variáveis originais. Esse resultado revela que a variabilidade do P pode estar contribuindo para a existência de heterogeneidade nos rendimentos.

O quarto componente principal engloba 8,27 % da variância total dos dados, e não apresentou nenhuma correlação considerada forte com as variáveis originais.

Os resultados da análise multivariada pelo método de componentes principais revelaram que as áreas têm comportamentos distintos quanto à condição dos atributos

químicos do solo. Em TS, os problemas relacionados com a acidez e disponibilidade de Ca e Mg estão limitando o rendimento das culturas em muitas subáreas da lavoura. Já em PM, os atributos químicos não foram suficientes para explicar a variabilidade de rendimento, pois os teores dos principais nutrientes são elevados, sendo necessária, assim, a inclusão de outros atributos nesse tipo de avaliação.

## 4.6. Conclusões

A área de Trindade do Sul possui limitações de rendimento relacionadas à acidez do solo e à disponibilidade de bases.

Em Palmeira das Missões, os atributos químicos não são suficientes para explicar as variabilidades ocorridas no rendimento, o qual deverá ser investigado.

A dependência espacial dos atributos químicos do solo revelou que a malha de 100 x 100 m foi adequada para todos os atributos estudados em ambas áreas estudadas, com exceção do fósforo na área de Trindade do Sul.

O fósforo apresentou a menor dependência espacial entre os atributos químicos de solo avaliados.

A análise multivariada pelo método de componentes principais mostrou-se uma eficiente técnica no diagnóstico de problemas limitantes ao rendimento das culturas.

A altitude apresenta boas correlações com os atributos de solo, indicando grande influência da topografia no comportamento espacial da maioria das variáveis estudadas.

A variabilidade química do solo existente nas áreas estudadas sinaliza que as correções e fertilizações devem ser realizadas considerando-se a heterogeneidade, a fim de racionalizar o uso dos insumos.

#### 4.7. Referências bibliográficas

AFIFI, A.A.; CLARK, V. **Computer-aided multivariate analysis**. New York: Chapman & Hall, 1996. 455 p.

ANTUNIASSI, U.R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: GUEDES, J.V.C.; DORNELES, S.H.B. (Org.) **Tecnologia e segurança na aplicação dos agrotóxicos** - novas tecnologias. Santa Maria : Departamento de Defesa Fitossanitária; Sociedade de Agronomia de Santa Maria, 1998. p.53-63.

BERG, M.V.D. ; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21,n.21, p393-399, 1997.

BLACKMORE, B.S. **An information system for precision farming**. Silsoe. Inglaterra : The Centre for Precision Farming. Cranfield University, 1996. p.09. Disponível na Internet. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/ISPF/ispf3.pdf>. em 22 Jul. 1999. Trabalho apresentado em the Brighton Conference Pests and Diseases 1996.

BLACKMORE, B.S.; *et al.* **The role of precision farming in sustainable agriculture: a European perspective**. Minneapolis/USA, 1994. P.13. Disponível na Internet. -z <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/pfsusag2/pfsusag2.pdf> em 22 Jul. 2006.

BORTOLUZZI, E. C.; *et al.* Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.03, p. 327-335, 2005.

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

CAMBARDELLA, C. A.; *et al.* E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.58, n.5, p. 1501-1511, 1994.

CANAL, I. N.; MIELNICZUK, J. Parâmetros de absorção de potássio em milho (*Zea mays* L.), afetadas pela interação alumínio-cálcio. **Ci. Cultura**, v. 35, p. 336-340, 1983.

CANZIAN, E.; *et al.* **Projeto de um monitor de semeadora com GPS para pesquisa em agricultura de precisão**. Disponível na Internet. <http://www.pcs.usp.br/~laa/projetos.html> em 27 Jul. 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CONCEIÇÃO, Paulo Cesar et al . Soil organic matter and other attributes as indicators to evaluate soil quality in conservation systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa , v.29,n.5,2005. Disponível em:<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832005000500013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832005000500013&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 05 Feb 2006. Pré-publicação. doi: 10.1590/S0100-06832005000500013

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

DAVIS, G., CASADY, W.; MASSEY, R **Precision agriculture: An introduction.** Water quality. University of Missouri-System, 1998. P.8. Disponível na Internet. <http://www.fse.missouri.edu/mpac/pubs/wq0450.pdf> em 17 Jun. 1999.

DOBERMANN, A.; PING, J.L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, v.96, n.1, p.285-297, 2004.

EMBRAPA- Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária de Solos (Rio de Janeiro). **Manual de Métodos de análise de solo** -2<sup>a</sup> ed. vev. atual. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

\_\_\_\_\_. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FRAISSE, C.W.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R. **Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity.** Transactions of the ASAE, v. 44, n. 1, p. 155-166, 2001.

FOY, C.D.; FLEMING, A.L. The physiology of plant tolerance to excess available aluminum and manganese in acid soils. In: JUNG, G.A. **Crop tolerance to suboptimal land condition.** Madison : Soil Science Society of American, 1978. p.301-338.

FOY, G.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, v.29, p.511-566, 1978.

GIOTTO, L; ROBAINA, A. D. ; SULZBACH, L. **A agricultura de precisão como o Sistema CR Campeiro5.** Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural, 2004. 330 p.

GOBIN, A.; CAMPLING, P.; FEYEN J. Soil- Landscape modelling to quantify spatial sariability of soil texture. **Physics and Chemistry of the Earth**. v.26, p.41-45, 2001.

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

JENNY, H. **Factors of soil formation.** New York, McGraw-Hill, 1941. 281p.

KIST, S. L. **Suprimento de potássio em argissolo com histórico de adubação potássica.** 2005. 68f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**. London: Academic Press, 1989. 521 p.

MENEGATTI, L.A.A. **Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade**. 2002, 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MILLER, W.; SUPALLA, R. **Precision farming in Nebraska**: A status report, 1996. Disponível na Internet. <http://ianrwww.unl.edu/pubs/farmmgmt/nf305.htm> em 21 Ago. 2005.

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

MULLA, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil Spatial Variability. - In: SUMMER, M. E. **Handbook of science**. New York: CRC Press, 1999, p.A321-A351,.

NELSON, D.W. ; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. ; KENNEY, D.R., eds. **Methods of soil analysis**: chemical and microbiological properties. Part 2. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.539-579.

NIZEYIMANA, E.; BICKI, T. J. Soil and soilandscape relationships in the North Central region of Rwanda, East-Central Africa. **Soil Science**, v.153, n.2, p.225-236, 1992.

PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D. J.; RAWLS, W. J. Soil water retention as related to topographic variables. **Soil Science Society American Journal**, v. 65, p.1787–1795, 2001.

PARKIN, C.S.; BLACKMORE, B.S. **A precision farming approach to the application of agrochemicals**.1995.p.7DisponívelnaInternet.[http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/B\\_AAS/BAAS.pdf](http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/B_AAS/BAAS.pdf) em 27 Jul.1999. Trabalho apresentado na British Association for the Advancement of Science meeting, University of Newcastle-upon-Tyne, September 12th, 1995.

PEREIRA, V. P.; FREIRE, J.T. **Solo** – propriedades. Apostilia do curso de solos. Jaboticabal: UNESP, 1971. 22 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

REETZ, H.F.Jr.; FIXEN, P.E. **Strategic approach to site-specific systems**. Site-specific managementguidelines.1999.DisponívelnaInternet.<http://www.farmresearch.com/SSMG/ssmg-28/SSMG28.pdf> em 04 Dez. 1999.

ROZA, D. Novidade no campo: Geotecnologias renovam a agricultura. Revista **InfoGEO**, n11-jan/fev, 2000.Disponívelna Internet. [http://www.infogeo.com.br/Revista/materia\\_11.htm](http://www.infogeo.com.br/Revista/materia_11.htm) em 21 Mai. 2006.

SÁ, J.C.M. Manejo da Fertilidade do Solo no Sistema de Plantio Direto, In: \_\_\_\_\_, *Plantio Direto no Brasil* Passo Fundo, Aldeia Norte, 1993. p.37-60.

SEARCY, S.W. **Precision farming**: A new approach to crop management. Texas Agricultural Extension Service. The Texas A&M University System, 1997. p.4. Disponível na Internet. <http://agpublications.tamu.edu/pubs/eengine/15177.pdf> em 22 Mar. 2000.

SHATAR, M. T., MCBRATNEY, A. B. Empirical modeling of relationships between sorghum Yield and soil properties. Precision Agriculture, Kluwer Academic Publishers, 1999, p.249-76, v.1

SILVEIRA, M. J. da. Produtividade e análise econômica da utilização de nitrogênio e submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.2, p. 327-335, 2005.

SOUZA, C. K.; *et al.* Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, n.2, p.1067-1074, 2003.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob o cultivo da cana-de-açúcar. **Irriga**, p.1-11, 2004.

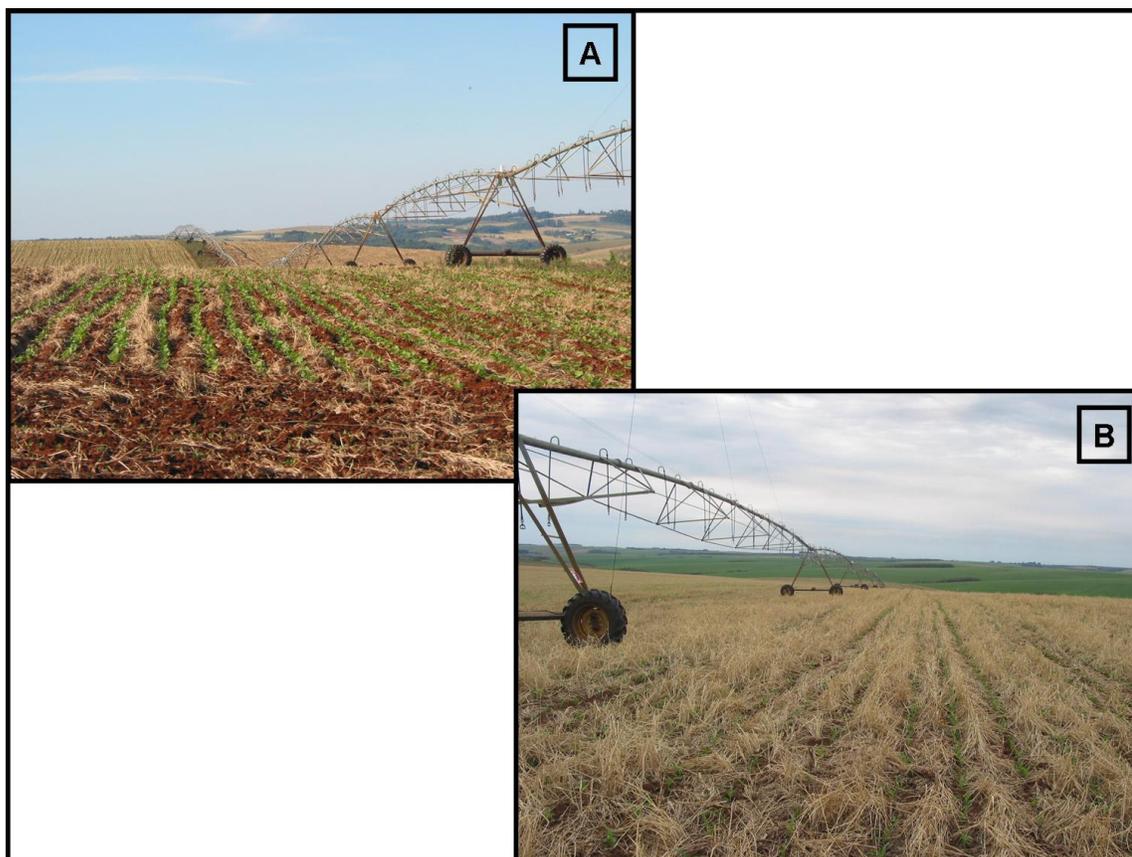
TEDESCO, M.J.; *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. Ed.rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos;5)

TSCHIEDEL, M. ; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ci. Rural**, v32, n , p159-163, 2002.

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

## **4.8. Anexos**

**ANEXO A** – Áreas irrigadas por pivô central estudadas, (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.



**ANEXO B** - Médias dos atributos químicos do solo, nas diferentes classes de altitudes em Trindade do Sul, RS.

Variável	Classes de altitude (m) <sup>1</sup>				
	595	605	615	625	635
Argila (%)	78,10	73,25	72,63	74,51	77,48
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	5,30	5,29	5,46	5,50	5,63
Fósforo (g dm <sup>-3</sup> )	15,86	15,20	16,16	11,46	6,96
Potássio (g dm <sup>-3</sup> )	168,69	186,68	218,01	240,31	258,49
Matéria Orgânica (%)	3,75	3,60	3,72	3,67	3,44
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,86	0,87	0,77	0,88	0,96
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,02	1,95	2,12	1,98	2,14
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,68	4,33	4,81	4,75	4,94
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,11	8,25	8,04	7,92	8,06
Saturação por Al (%)	10,65	10,46	10,13	12,20	12,50
Saturação por Bases (%)	58,25	58,54	59,53	58,60	61,37

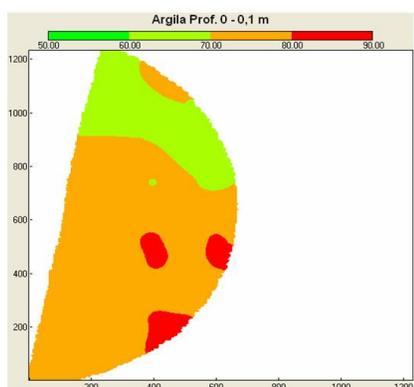
<sup>1</sup> Média correspondente a uma variação de 5 metros para mais e para menos.

**ANEXO C** - Médias dos atributos químicos do solo, nas diferentes classes de altitudes em Palmeira das Missões, RS.

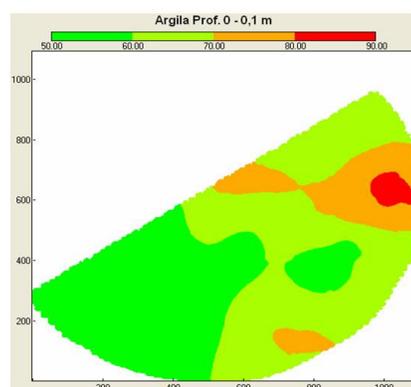
Variável	Classes de altitude (m) <sup>1</sup>						
	550	560	570	580	590	600	610
Argila (%)	72,14	67,07	62,98	62,47	56,46	52,30	52,07
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	6,34	6,32	6,27	6,36	6,24	6,13	6,09
Fósforo (g dm <sup>-3</sup> )	14,88	15,80	14,12	14,04	16,98	19,31	18,48
Potássio (g dm <sup>-3</sup> )	165,89	178,58	173,80	187,38	225,50	225,52	222,24
Matéria Orgânica (%)	2,72	2,91	3,05	3,13	3,17	3,03	2,77
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,77	1,61	1,50	1,58	1,44	1,37	1,45
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,65	6,44	6,13	5,90	5,64	5,37	5,38
CTC – Efetiva (c mol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,84	8,49	8,08	7,96	7,64	7,32	7,40
Saturação por Al (%)	0	0	0	0	0	0	0
Saturação por Bases (%)	84,19	83,30	81,52	82,76	80,18	77,71	76,89

<sup>1</sup> Média correspondente a uma variação de 5 metros para mais e para menos.

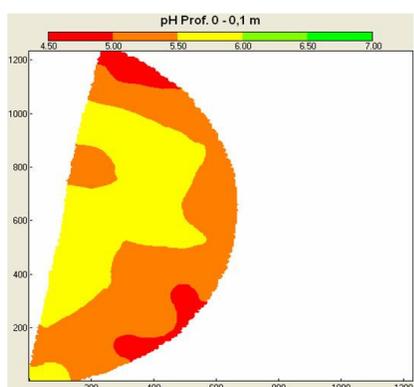
**ANEXO D** – Mapas de atributos químicos das áreas em estudo, (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.



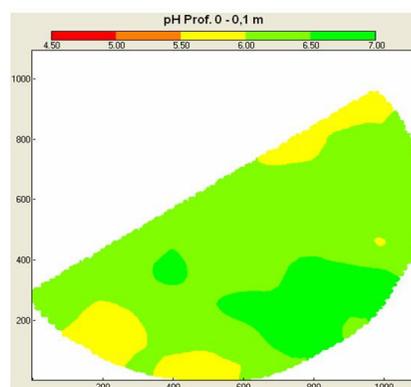
**A**



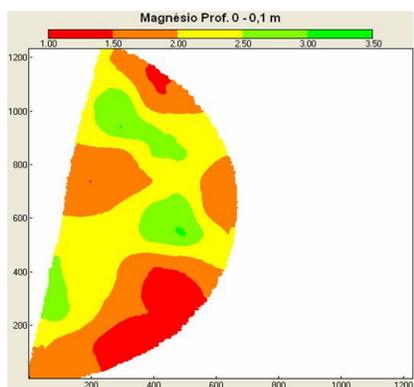
**B**



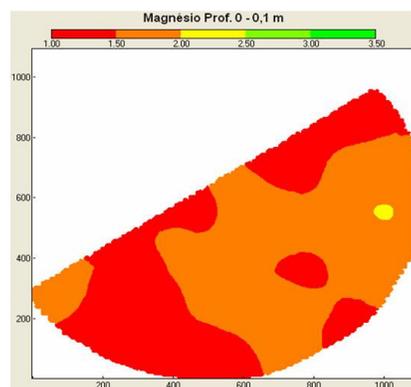
**A**



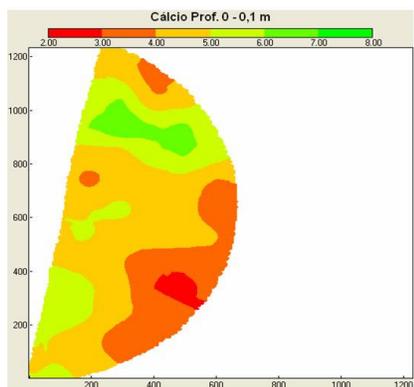
**B**



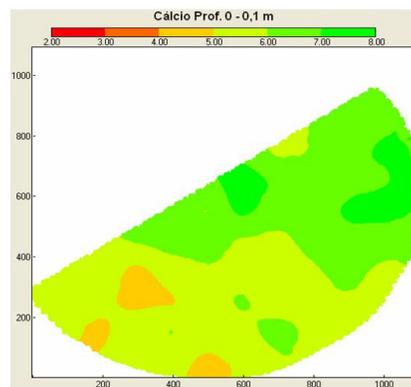
**A**



**B**

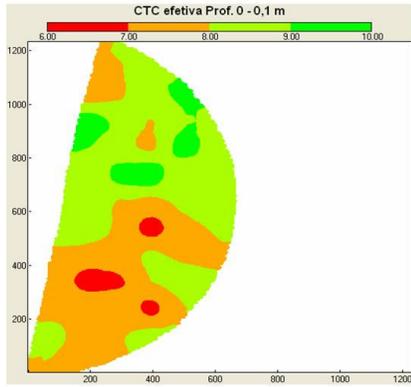


**A**

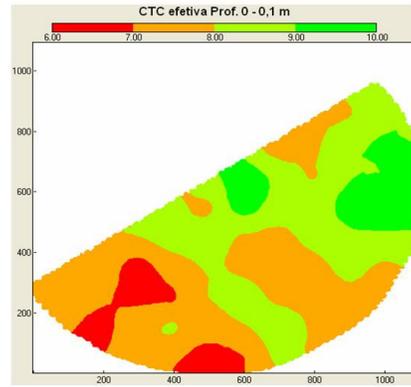


**B**

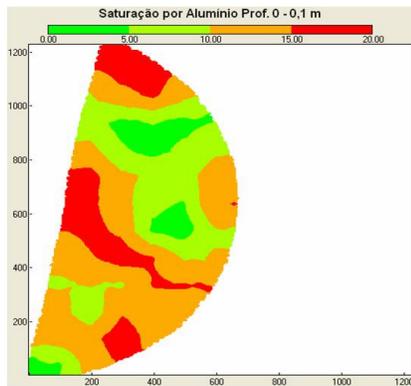
...continuação...



A



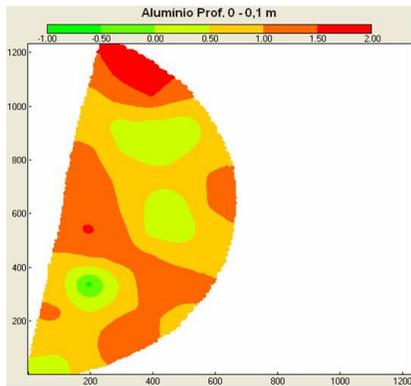
B



A

Não apresenta Saturação

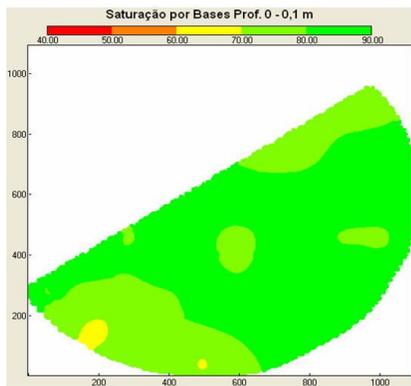
B



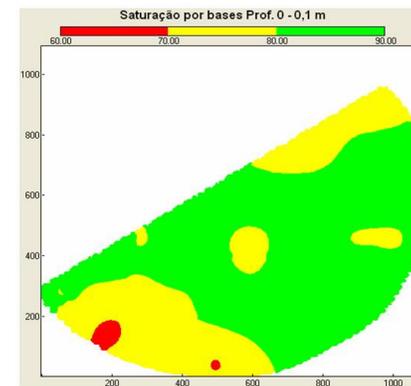
A

Não apresenta Alumínio

B

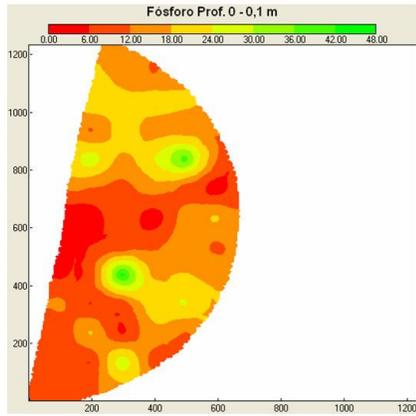


A

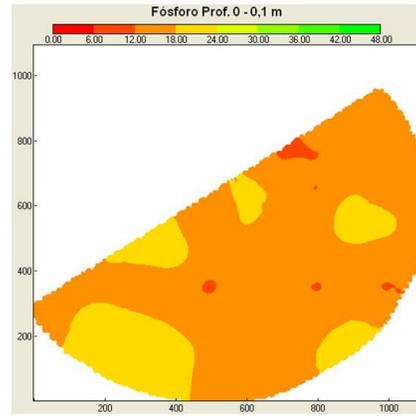


B

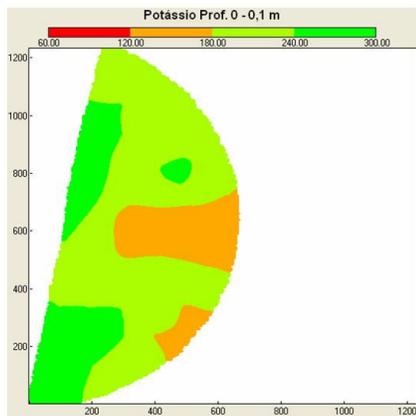
...continuação...



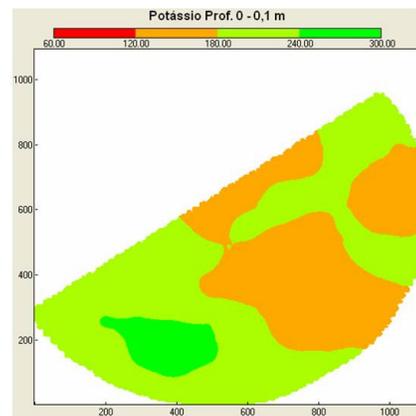
A



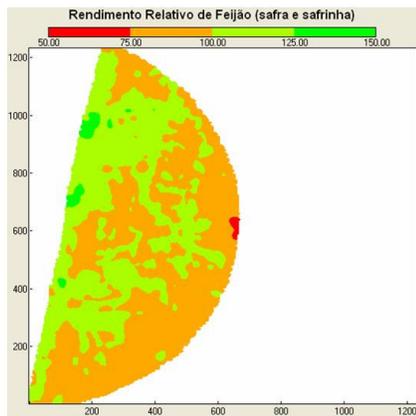
B



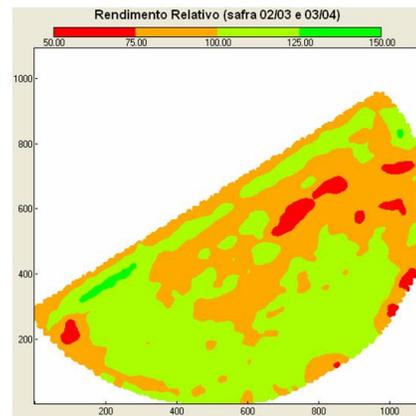
A



B



A



B

## 5. CAPÍTULO II: VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO NAS ZONAS DE RENDIMENTO, EM DUAS ÁREAS IRRIGADAS.

### Resumo

A variabilidade existente nas lavouras agrícolas tem despertado interesse nos técnicos e produtores rurais nas últimas décadas. Para manejar essa variabilidade, surge a agricultura de precisão, a qual, através de ferramentas modernas e inovadoras, passa a administrar os campos produtivos considerando a sua heterogeneidade. As variações do solo em uma paisagem são resultados dos seus fatores de formação e ações antrópicas, as quais irão determinar, conseqüentemente, a variabilidade nos rendimentos dos cultivos. A modificação de alguns atributos químicos e físicos de solo pelo sistema produtivo empregado pode levar a conseqüências muitas vezes negativas ao rendimento das culturas, em especial em áreas irrigadas. O objetivo desse trabalho foi de caracterizar, quantificar e avaliar a variabilidade dos principais indicadores químicos e físicos do solo em três zonas de rendimento (baixo, médio e alto) de áreas irrigadas. O estudo foi conduzido em duas lavouras comerciais, nos municípios de Trindade do Sul (TS) e Palmeira das Missões (PM), com 51,8 (TS) e 58,2 (PM) hectares irrigados com pivô central. As informações de precipitação foram obtidas a partir dos históricos da Tractebel Energia S.A. (TS) e da propriedade (PM). As zonas de rendimento foram estabelecidas de acordo com a metodologia proposta por Molin, 2002. A amostragem foi realizada na linha e entre linha com trado calador a uma profundidade de 0-0,1 m com dez repetições em cinco diferentes pontos de cada zona de rendimento estudada. As amostras foram submetidas à análise química e física, a fim de obter a quantificação dos teores de Ca, Mg, P, K, CTC, Al, MO, a saturação por Al, a saturação por bases e os valores de pH e SMP para as duas áreas em estudo, bem como parâmetros físicos, como textura, densidade, porosidades, resistência à penetração, infiltração de água e curva de retenção. Os dados foram analisados a partir da média dos atributos químicos e físicos encontrados nos pontos amostrais, relacionando-os com o rendimento de cada zona. As médias de pH revelaram que, em TS, a zona de baixo rendimento obteve pH 5,21, estando abaixo do nível crítico recomendado pela CQFS (2004). Contudo, por apresentar pH abaixo e próximo do crítico ocorreu a presença de saturação por Al no complexo de troca. Já em PM, não foi detectado Al trocável, pelo fato de apresentar maiores índices de pH. Em ambas as áreas, os teores de potássio e fósforo foram superiores ao nível crítico estabelecido pela CQFS (2004). A textura também comportou-se de maneira semelhante nas duas áreas, mas a densidade apresentou níveis mais elevados na área de PM, alcançando  $1,42 \text{ g cm}^{-3}$  na zona de baixo rendimento (nessa zona, a macroporosidade ultrapassou o limite crítico, alcançando níveis preocupantes de 8 e 9,77 % nas camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m de profundidade, respectivamente). A infiltração de água no solo obteve índices de 83,9 (TS) e 27,9 % (PM) na zona de baixo rendimento, enquanto que na zona de alto rendimento a percentagem foi de 92,8 (TS) e 40,1 % (PM). Em TS, a CAD alcançou 24,45 e 38,83 mm na camada de 0-0,2 m e em PM 32,40 e 38,66 mm para as zonas de baixo e alto rendimento, respectivamente.

Palavras-chave: Zonas de rendimento, variabilidade do solo; variabilidade de rendimento, irrigação; manejo do solo; disponibilidade de água.

## 5.1. Introdução

A agricultura pode ser considerada como a ciência ou a arte de cultivar o solo desenvolvendo culturas de interesse para o bem estar humano, sem degradar o ambiente, visando à máxima rentabilidade econômica das culturas, as quais dependem dos fatores de produção (solo, clima, plantas, insumos e equipamentos).

O conhecimento dos atributos do solo é de suma importância para o sucesso da agricultura. O solo é um corpo anisotrópico, sendo a sua anisotropia evidenciada nas direções vertical e horizontal, caracterizada pela diferenciação de camadas, denominadas horizontes, e pelas variações de atributos do solo que ocorrem numa mesma camada.

Tradicionalmente não se tem considerado a existência de variações das propriedades e de atributos do solo vertical e horizontalmente, embora a anisotropia no solo seja há muito tempo conhecida. Baseada nessa filosofia, a agricultura tem sido desenvolvida de tal forma que, uma vez conhecido um determinado tipo de solo e/ou seus atributos, todas as análises são feitas considerando-se que, dentro das camadas, as propriedades e atributos são semelhantes para cada área referida.

A variabilidade espacial de solos e plantas tem motivado inúmeros estudos (Machado, 1994; Castro, 2004; Silva, 2003; Souza, 2004), sendo facilitados recentemente pelo uso de ferramentas específicas de agricultura de precisão. Ultimamente, pesquisadores, técnicos e produtores têm dado atenção especial às variações ocorridas dentro dos talhões, buscando minimizar as variâncias através do gerenciamento das culturas, considerando a variabilidade de rendimento ocorrida. Isso tem sido possível graças ao avanço da informática, a qual possibilita o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo e da construção de mapas de produção através de técnicas de georeferenciamento. Essas técnicas de georeferenciamento da produtividade vêm sendo chamadas, então, de agricultura de precisão (Molin, 1997; Sanaei & Yule, 1996; Schueller, 1992).

A heterogeneidade existente nas lavouras é resultado de propriedades intrínsecas do solo, as quais determinam a sua anisotropia. Em uma paisagem natural, o solo apresenta ampla variabilidade dos seus atributos, tanto na horizontal como na vertical, resultante da interação entre os processos que comandam os fatores e sua formação. Ademais, o solo cultivado apresenta fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura (Carvalho et al., 2003). Portanto, a variabilidade pode ser alterada pelo manejo do solo (Cassel & Nielsen, 1986; Souza, 1992), no qual diferentes sistemas de

manejo resultarão em distintas condições de equilíbrio químico e físico do solo, que podem ser desfavoráveis ao rendimento das culturas.

Com o aumento do tempo de uso do sistema plantio direto (SPD), os atributos físicos/químicos dos solos são gradualmente modificados. Dentre esses atributos, destacam-se a densidade do solo (a qual mostra tendência de aumento nos primeiros anos de cultivo e de diminuição com o passar dos anos), o aumento da porosidade total e o aumento no tamanho de agregados (Da Ros et al., 1997). Entretanto, a utilização desse sistema em áreas irrigadas tem comportamento diferenciado e ainda não está suficientemente descrita, sendo necessária a geração de informações sobre outros atributos físicos/químicos e seus efeitos nos rendimentos das culturas.

A utilização intensiva de equipamentos agrícolas em todas as operações agrícolas (semeadura, tratos culturais e colheita) tem promovido aumento da compactação, principalmente na zona de exploração do sistema radicular das plantas. A principal razão desse fenômeno é a repetitividade das operações realizadas ao longo dos anos (Oliveira, 2002). Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada, tanto por meio de atributos físicos, tais como densidade do solo, distribuição de poros por tamanho e estabilidade de agregados em água, quanto por meio da resistência do solo à penetração.

Com a compactação, ocorrem reduções significativas, principalmente no volume de macroporos, os quais podem permanecer praticamente inalterados (Hillel, 1982). Isto afeta a infiltração da água no solo, que está relacionada diretamente com a macroporosidade do solo. Os macroporos são também importantes para o crescimento das raízes (Wang et al., 1986) e para o movimento de solutos (Beven & Germann, 1982). Modificações nessas propriedades podem resultar não só na redução da absorção de nutrientes pelas plantas, mas também em efeitos conjuntos sobre a fertilidade do solo, com implicações nos principais mecanismos de suprimento de nutrientes, quais sejam a difusão, o fluxo de massa e a interceptação radicular.

Valores de porosidade de aeração abaixo de  $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$  a  $0,15 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$  são, geralmente, aceitos como restritivos para o crescimento das plantas e prejudiciais à produtividade da maioria das culturas (Tormena et al., 2002). Para solos argilosos, densidades maiores que  $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$  podem indicar presença de compactação e redução na porosidade e, como consequência, menor desenvolvimento radicular e diminuição nas trocas gasosas que podem, em condições de maior umidade, induzir a falta de oxigênio às raízes ou, até mesmo, a toxidez de ferro.

De acordo com Klein et al. (1998), a densidade do solo é afetada por sistemas de manejo do solo, que alteram o espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando em

importantes propriedades físico-hídricas do solo, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência à penetração. Neste contexto, a porosidade total está diretamente relacionada à densidade e à permeabilidade, cujos valores são influenciados pelo manejo do solo.

O potencial da água no solo está diretamente ligado ao crescimento das plantas, conforme afirma Acevedo et al. (1971), que verificou uma drástica redução no crescimento das folhas de milho através de pequenas modificações do potencial da água no solo. A avaliação conjunta dos potenciais críticos para a máxima disponibilidade de água (CC – PMP), para a resistência à penetração e para a porosidade de aeração, permite identificar possíveis limitadores físicos ao desenvolvimento das plantas e aperfeiçoar os fatores de produção e de manejo na agricultura irrigada.

Em áreas irrigadas, o benefício promovido pela complementação hídrica, no sentido de elevar o rendimento (buscar a produção ótima do ponto de vista econômico), pode não estar sendo alcançado, uma vez que a existência de compactação pode impedir a adequada utilização da água disponível.

Lavouras que apresentam diferentes zonas de rendimentos (altos, médios e baixos), refletem, muitas vezes, condições físico-químicas de solo diferenciadas, que resultam em diferentes potenciais produtivos. No manejo de recursos em áreas específicas, a distribuição espacial de propriedades do solo pode fornecer subsídios para a tomada de decisões sobre a adoção de práticas de intervenção. Essas práticas podem ser conduzidas somente em áreas onde a relação entre valores das propriedades mostra a condição desfavorável ao desenvolvimento das plantas, comprometendo o potencial produtivo.

A variabilidade de rendimento e de atributos de solo, utilizando ferramentas da agricultura de precisão em áreas irrigadas com pivô central, tem sido pouco estudada no Sul do Brasil, em que pese o incremento da área irrigada. Segundo Christofidis (2005) e estimativas de Christofidis (2006), o Sul do Brasil possui 1,3 milhões de hectares irrigados, perfazendo 6,77 % da área agrícola cultivada. No RS, a área irrigada é de 1,3 milhões de ha irrigados, dos quais 35.000 são com pivô central.

Nesse sentido, a partir da utilização de ferramentas da agricultura de precisão, busca-se caracterizar a variabilidade do solo existente nas três zonas de rendimento (baixo, médio e alto) em duas áreas irrigadas, cultivadas comercialmente.

## **5.2. Objetivos gerais**

Caracterizar e relacionar os atributos de solo com os potenciais produtivos em três zonas de rendimento (baixo, médio e alto).

## **5.3. Objetivos específicos**

- Caracterizar e quantificar os atributos do solo nas três zonas de rendimento;
- Identificar atributos de solo que limitam o potencial produtivo das culturas nas áreas investigadas;

## **5.4. Material e métodos**

O estudo se realizou em duas áreas agrícolas comerciais irrigadas situadas nos municípios de Trindade do Sul e Palmeira das Missões (RS), ambos representantes da principal região produtora de grãos do RS e distantes 80 km entre si.

### **5.4.1. Área experimental**

#### **➤ Trindade do Sul - RS**

O estudo foi realizado em uma lavoura comercial de 51,8 ha irrigados por pivô central pertencente à Granja Agrícola Bela Vista, localizada ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Trindade do Sul, situado entre as coordenadas UTM 324.538 (W) a 325.038 (W), e 6.950.780 (S) a 6.950.780 (S), fuso 22 Sul, em uma altitude média de 614 m, usando datum WGS84.

Conforme a Embrapa (1999), essa região situa-se na zona da escarpa arenita basáltico do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho aluminoférrico, com elevados teores de argila. O sistema de manejo empregado, a

aproximadamente onze anos, é o de plantio direto, com cultivo de cereais, soja, feijão e milho, no verão, e culturas de cobertura no inverno.

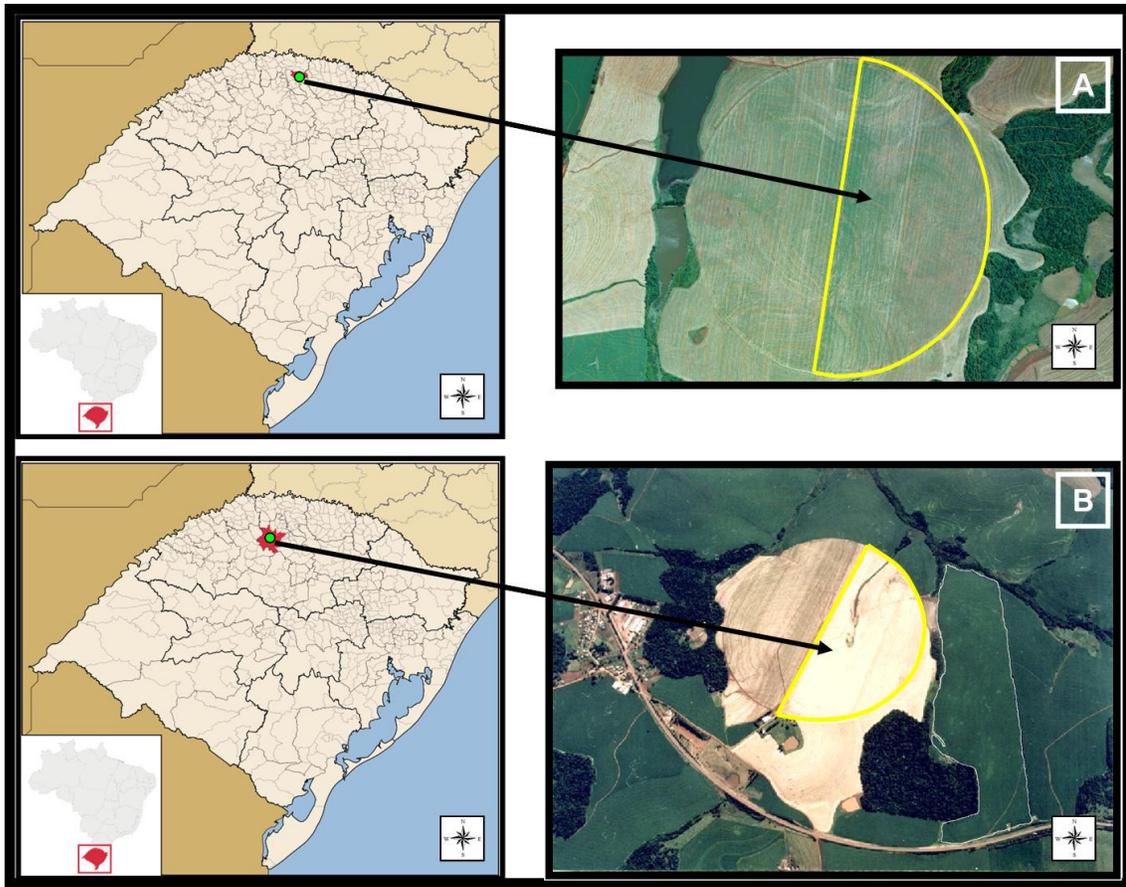
O clima da região, segundo a classificação de Köeppen é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média anual é de 18,7°C, máxima 39°C e mínima -5°C. A precipitação pluviométrica alcança 1618 mm ano<sup>-1</sup>.

#### ➤ **Palmeira das Missões, RS**

O presente estudo foi realizado em uma área comercial de 58,2 ha irrigados por pivô central, localizada no município de Palmeira das Missões - RS, km 15 da BR-468, situada entre as coordenadas UTM 262.517.3 (W) a 263.417.3 (W), e 6.919.887 (S) a 6.919.987 (S), fuso 22 Sul, numa altitude aproximada de 576 m, usando datum WGS84.

Conforme a Embrapa (1999), essa região situa-se na zona da escarpa arenito basáltica do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 m e elevados teores de argila. O sistema de manejo empregado, a aproximadamente dez anos, é o de plantio direto, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno, e culturas da soja e do milho no verão.

O clima da região, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média normal do mês mais quente do ano, janeiro, é de 24,6°C, enquanto que a do mês mais frio, junho, fica em 12,9°C. Quanto à média normal das máximas, esta é de 30,4°C, em janeiro e de 19,2°C, em junho. A média das temperaturas mínimas do mês mais quente, dezembro, é de 18,7 °C, e a do mês mais frio, junho, é de 9,3 °C. As chuvas são distribuídas regularmente em praticamente todos os meses do ano, sem estação seca definida com precipitação oscilando entre 1.500 mm a 1.750 mm anuais.



**Figura 1** – Mapa da localização das áreas experimentais (esquerda), e a vista aérea (direita). (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

#### 5.4.2. Irrigações realizadas

As lâminas de água aplicadas sobre as áreas obedeceram aos critérios adotados pelos proprietários das áreas, que observam as condições climáticas vigentes e as recomendações do fabricante do sistema de irrigação. As lâminas de irrigação complementar de 92,0 e 60,6 mm representam as quantidades totais fornecidas no ciclo do feijão, distribuídas em lâminas de 8,36 e 7,57 mm na área de TS, na safra 2005/06, e safrinha 2006/06, respectivamente. Já em PM, a cultura do milho, nas safras 2002/03 e 2003/04, recebeu 95,4 e 110,6 mm, os quais foram distribuídas em lâminas de 9,5 e 12,3 mm, respectivamente. As precipitações ocorridas no período estudado são apresentadas nas Figuras 2 e 3.

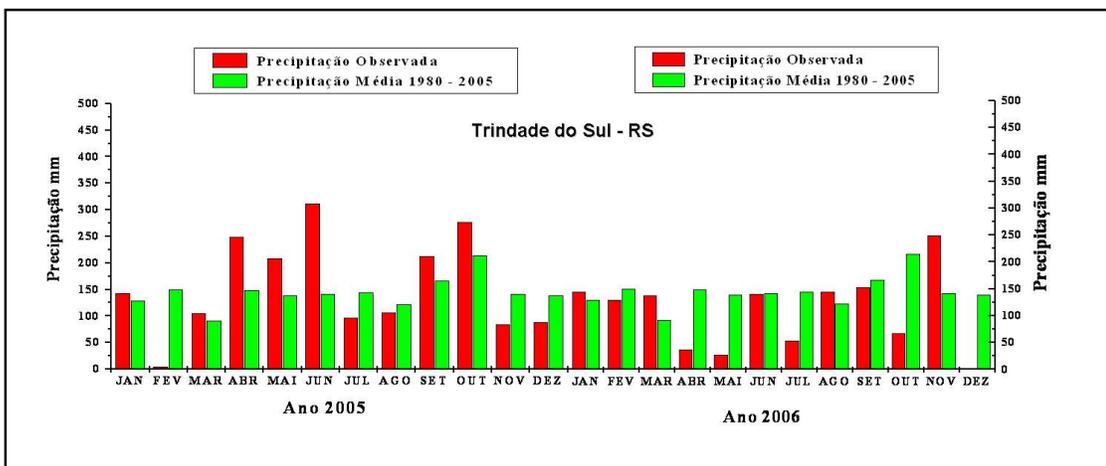


Figura 2 – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental Trindade do Sul, RS.

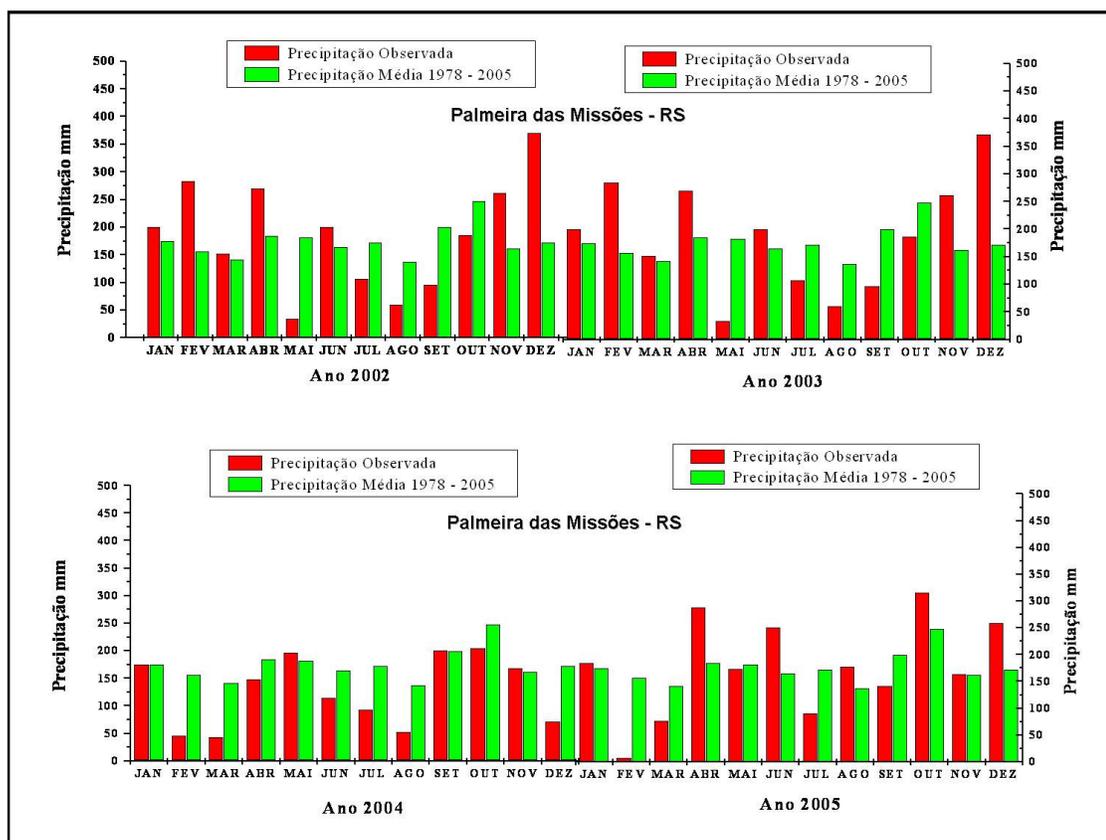


Figura 3 – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.

### 5.4.3. Dados de produtividade

#### 5.4.3.1. Coleta dos dados

##### ➤ Trindade do Sul - RS

Os dados de produtividade georeferenciados foram coletados na safra e na safrinha 2005/06 da cultura do feijão, através de uma colhedora CASE modelo 2388, equipada com Sistema AFS<sup>®</sup> (Advanced Farming Systems) de agricultura de precisão (Figura 4). Essa, congrega um conjunto de ferramentas, como sensores de rendimento e umidade, cartão PC de armazenamento de dados ATA *flash* e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global – GPS marca Trimble<sup>®</sup>.

A tecnologia presente nesta colhedora 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. O erro estimado nos dados de rendimentos obtidos é inferior a 4 %<sup>2</sup>.

##### ➤ Palmeira das Missões – RS

Os dados de produtividade georeferenciados da cultura de milho foram obtidos nas safras 2003/04 e 2004/ 05, através de uma colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o sistema Fieldstar<sup>®</sup> de agricultura de precisão (Figura 2). Este congrega um conjunto de sensor de rendimento do tipo Micro-Track<sup>®</sup> de duas hastes, cartão para armazenamento de dados tipo PCMCIA e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global (GPS) da marca Garmin<sup>®</sup>. A tecnologia embarcada nessa colhedora permite que o usuário registre e armazene, em um determinado intervalo de tempo, a posição (latitude, longitude e altitude) da máquina e a quantidade de produção por unidade de área.

A colhedora utilizada nesta pesquisa não estava equipada com sensor de umidade de grãos, então a correção desse fator necessitou tratar cada carga como um arquivo individual no sistema de armazenamento dos dados. Após a colheita do volume de grãos correspondente a cada carga, o volume era pesado e descarregado, com posterior retirada de amostra de grãos

---

<sup>2</sup> Manual AFS<sup>®</sup>

para determinação de umidade e impurezas. Essas últimas foram corrigidas, obtendo-se, assim, dados de produtividade com elevado grau de confiabilidade, baseando-se na conferência do peso do produto registrado pela balança e o estimado pelo sistema da colhedora. Neste caso, o erro estimado é inferior a 2%, segundo o proprietário (Sulzbach, 2006<sup>3</sup>). O sensor de rendimento de grãos era submetido à limpeza duas vezes ao dia (manhã e tarde). A velocidade de deslocamento da máquina foi mantida constante e, após cada descarga do tanque graneleiro, o ponto zero era conferido.



**Figura 4** – Colhedora CASE 2388, equipada com Sistema AFS<sup>®</sup> (A), e colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar<sup>®</sup> (B).

#### 5.4.3.2. Tratamento dos dados

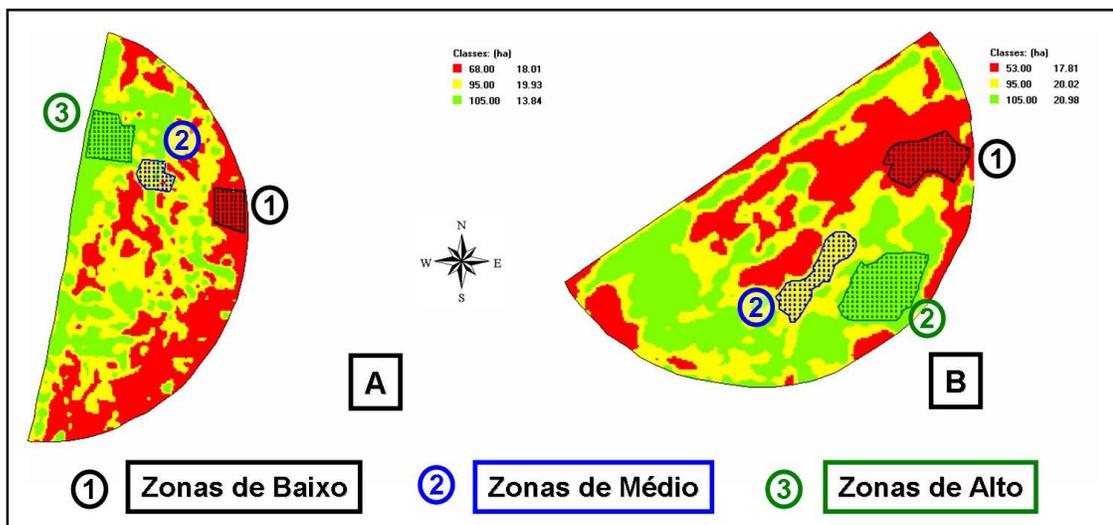
Os dados georeferenciados de rendimento foram coletados com frequência de 1 e 2 segundos nas áreas de PM e TS, respectivamente, gerando uma malha de alta densidade de pontos. Os dados de colheita da área de TS foram submetidos a um processo de filtragem, a fim de identificar e eliminar eventuais erros (“outliers”), como proposto por Menegatti (2002). Após isso, os dados de colheita (TS e PM) sofreram um processo de redução da densidade de pontos georeferenciados. As áreas mapeadas foram divididas em quadrículas (células) com dimensões de 13 x 13 m, perfazendo uma área de 169 m<sup>2</sup> para ambas as áreas (Figura 3). A densidade final foi de aproximadamente 59 pontos de rendimento ha<sup>-1</sup>, totalizando 3.045 em TS e 3.466 para PM, os quais contêm informações de latitude, longitude e a massa de grãos. Os dados de produtividade de cada colheita passaram por análise de

<sup>3</sup> Comunicação pessoal

estatística exploratória, com o objetivo de verificar a amplitude da variação existente no rendimento das áreas estudadas.

Para a definição das zonas de rendimento, baseou-se na metodologia proposta por Molin (2002), a qual estabelece classes < 95 %, 95 – 105 % e > 105 % do rendimento. O total de pontos de rendimento georeferenciados totalizou 173, 97 e 122 na área de TS e 100, 43 e 63 pontos em PM para as zonas de rendimento alto, médio e baixo rendimento estabelecidos (Figura 5).

Os dados de produtividade de cada safra foram submetidos a uma análise estatística exploratória, através do Golden Software Grapher Version 3 (2000), objetivando verificar a amplitude de variação existente nas três zonas de rendimento estudadas.



**Figura 5** – Localização das zonas de rendimento e visualização dos pontos de rendimentos nas três zonas, nas áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

#### 5.4.4. Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas manualmente no segundo semestre de 2005, através de trado calador (Figura 6).



**Figura 6** – Detalhe da coleta das amostras de solo nos pontos georeferenciados, na profundidade de 0 a 0,1 m para as duas áreas em estudo.

A coleta das amostras foi realizada na linha (uma) e entre linha (duas) de plantio, a uma profundidade de 0 a 0,1 m. Nos pontos de coleta, eram realizados 5 amostragens em diferentes pontos de cada zona de rendimento, cada amostra foi composta de 5 sub-amostragens, a fim de compor uma amostra composta.

#### **5.4.5. Análise e determinações de solo**

As determinações foram realizadas segundo metodologias descritas por Tedesco et al. (1995) e Embrapa (1997). Os atributos químicos avaliados foram o pH em água (relação 1:1), o índice SMP, os teores de fósforo e de potássio, extraídos por Mehlich I (relação 1:10) e alumínio, cálcio e magnésio trocáveis, extraídos por KCl 1M. Também foi determinado o teor de argila das amostras, pelo método do densímetro. Foram realizadas três repetições de laboratório para cada amostra analisada e os procedimentos analíticos seguiram a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). A partir desses dados foram calculadas as somas de bases, a CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e a saturação por bases e por alumínio.

O conteúdo de carbono orgânico foi determinado pelo método de Mebius, modificado por Yeomans & Bremner (1989), após digestão de uma amostra de 1 ml de solo, 5 ml de  $K_2Cr_2O_7$  e 7,5 ml de  $H_2SO_4$  p.a., por 30 minutos, a 170°C. A digestão foi conduzida em bloco digestor de 40 provas, utilizado na análise de N. Os extratos obtidos foram transferidos para Erlenmeyer de 125 ml de capacidade com água deionizada, e titulados com uma solução de

$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0,5N (sal de Mohr), utilizando-se uma solução aquosa de fenantrolina como indicador.

A determinação granulométrica consistiu na quantificação do teor de argila (<0,0002 mm), silte (0,05 - 0,002 mm), areia fina (0,20 - 0,05 mm) e areia grossa (2 - 0,2 mm), baseado na metodologia da pipeta descrita por Day (1965). Como dispersante foi usado o NaOH e não se realizou a destruição da matéria orgânica.

Para a determinação da densidade, da porosidade total, da microporosidade e da macroporosidade do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis metálicos com 0,06 m diâmetro e com 0,04 m de altura, em três profundidades 0 – 0,05, 0,05 – 0,1 e aos 0,1 – 0,2 m. A determinação da densidade seguiu metodologia descrita em EMBRAPA (1979) e as porosidades foram determinadas conforme Oliveira (1968).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada através de penetrômetro digital (marca DLG, modelo PNT 2000) com armazenamento eletrônico dos dados, possuindo ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e base de 12,83 mm de diâmetro (Anexo A). As determinações foram realizadas a cada 0,02 m de profundidade, nas seguintes épocas: antecedendo a semeadura da safra de feijão 2005/06 e após a colheita na área de TS, e antes da semeadura do milho 2005/06 e após a sua colheita em PM.

A curva de retenção de água no solo foi determinada através dos potenciais obtidos pela mesa de tensão (EMBRAPA, 1997), na qual foram estabelecidas duas colunas de água, uma de 0,1 e outra de 0,6 m equivalentes a 1 e 6 kPa, respectivamente, com cinco repetições. As amostras foram coletadas ao final da colheita de feijão na área de TS e logo após a semeadura da cultura do milho safra 2005/06 na área de PM, e preservadas em anéis metálicos com 0,06 m diâmetro e com 0,04 m de altura, em três profundidades, de 0 – 0,05 m, 0,05 – 0,1 m e a 0,1 aos 0,2 m. Logo depois, as amostras foram saturadas durante 24 horas e, subsequentemente, submetidas à tensão de 10 cm durante 72 horas. Após 72 horas de drenagem da água retida nos poros do solo, as amostras foram pesadas e, posteriormente colocadas de volta para serem submetidas à tensão de 0,6 m, onde também permaneceram durante mais 72 horas. Após tal procedimento, foram pesadas e transferidas para a câmara de Richards, na qual foram submetidas à tensão de 100 kPa em placas porosas, na câmara de pressão.

Uma vez cessada a drenagem em cada potencial, as amostras foram pesadas. Ao final da última pesagem, foram levadas para estufa a 105°C por 48 horas sendo pesadas novamente

e calculada sua umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). A umidade 1500 kPa foi obtida no aparelho psicrômetro “Dewpoint potentiometer – *Decagon* - modelo WP4” (WP4), no qual a umidade gravimétrica foi transformada em umidade volumétrica.

Para avaliação da infiltração de água no solo, foi utilizado o método de Cornell Sprinkle Infiltrometer (Anexo B), descrito por Van Es & Schindelbeck (2003), que consiste em um simulador portátil de chuva com volume de 20,6 litros e 69 tubos gotejadores na sua parte inferior, com 0,063 cm de diâmetro e 19 cm de comprimento cada um. Esse simulador é fixado sobre um cilindro de 24 cm de diâmetro e conta com um sistema de regulação de entrada de ar que permite simular diferentes intensidades de chuva.

## **5.5. Resultados e discussão**

### **5.5.1. Indicadores químicos do solo**

Analisando os dados da Tabela 1, observa-se que as áreas estudadas têm comportamento distinto em relação a seus indicadores químicos da fertilidade do solo nas diferentes zonas de rendimento. Na área de TS, pode-se perceber que os valores de pH e os teores de fósforo, potássio, e saturação de bases estão baixos na zona de baixo rendimento se comparados à zona de alto. O valor de pH 5,21 e a presença de Al trocável revelam que essa situação pode estar limitando a absorção de alguns nutrientes e contribuindo assim para a retração do rendimento, mesmo que as condições hídricas sejam supridas. Tais dados indicam que a calagem poderá ser uma prática de intervenção importante, cujos efeitos contribuirão para o fornecimento de cálcio e magnésio, para a neutralização da acidez do solo, aumento do pH, redução do alumínio e do manganês tóxico e aumento da CTC.

Em PM, os atributos químicos do solo apresentaram níveis acima dos teores críticos, com exceção dos teores de matéria orgânica na zona de baixo rendimento.

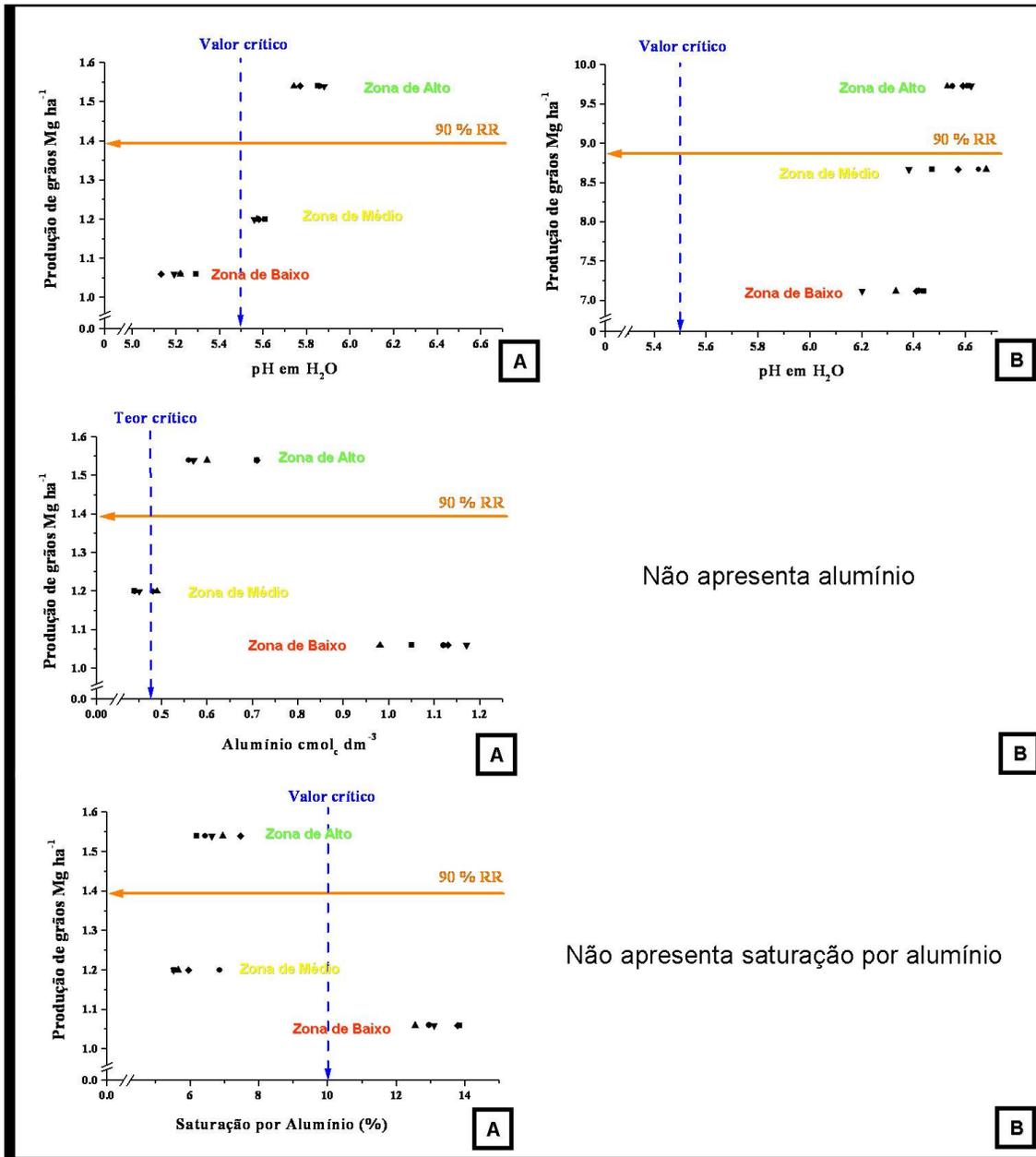
**Tabela 1** – Média de teores dos atributos químicos do solo e produtividade, avaliados nas zonas de rendimento – Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Variável	Zonas de rendimento/ Áreas experimentais <sup>(1)</sup>					
	Baixa		Média		Alta	
	TS	PM	TS	PM	TS	PM
Argila (%)	70,08	78,08	71,03	61,79	70,18	62,78
pH H <sub>2</sub> O (1:1)	5,21	6,36	5,58	6,55	5,81	6,58
Fósforo (g dm <sup>-3</sup> )	8,94	17,27	19,77	13,45	18,73	15,51
Potássio (g dm <sup>-3</sup> )	176,17	156,59	227,59	179,74	256,06	161,57
Matéria Orgânica (%)	3,81	2,53	3,81	3,21	3,79	3,26
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,09	0	0,46	0	0,63	0
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,67	1,87	2,19	1,63	2,41	1,54
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,77	7,01	5,07	5,77	5,83	5,90
CTC – Efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,66	9,27	8,54	7,88	8,92	7,85
Saturação por Al (%)	13,24	0	5,90	0	6,73	0
Saturação por Bases (%)	59,46	85,28	61,68	85,68	70,11	86,36
Produção de Grãos <sup>(2)</sup> Mg ha <sup>-1</sup>	1,06 (F)	7,12 (M)	1,20 (F)	8,67 (M)	1,54 (F)	9,73(M)
Rendimento Relativo	55,43	62,00	65,55	75,70	81,88	84,70

<sup>(1)</sup> Áreas experimentais, TS – Trindade do Sul e PM – Palmeira das Missões – RS;

<sup>(2)</sup> Médias de duas safras, TS - 2005/06 (safra) e 2006/06 (safrinha) de feijão (F) e, PM safras de Milho (M) 2002/03 e 2003/04.

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentados os gráficos dos teores encontrados entre os atributos de solo e os dados de produtividade com seus respectivos teores críticos segundo CQFS (2004), para as áreas de TS e PM.



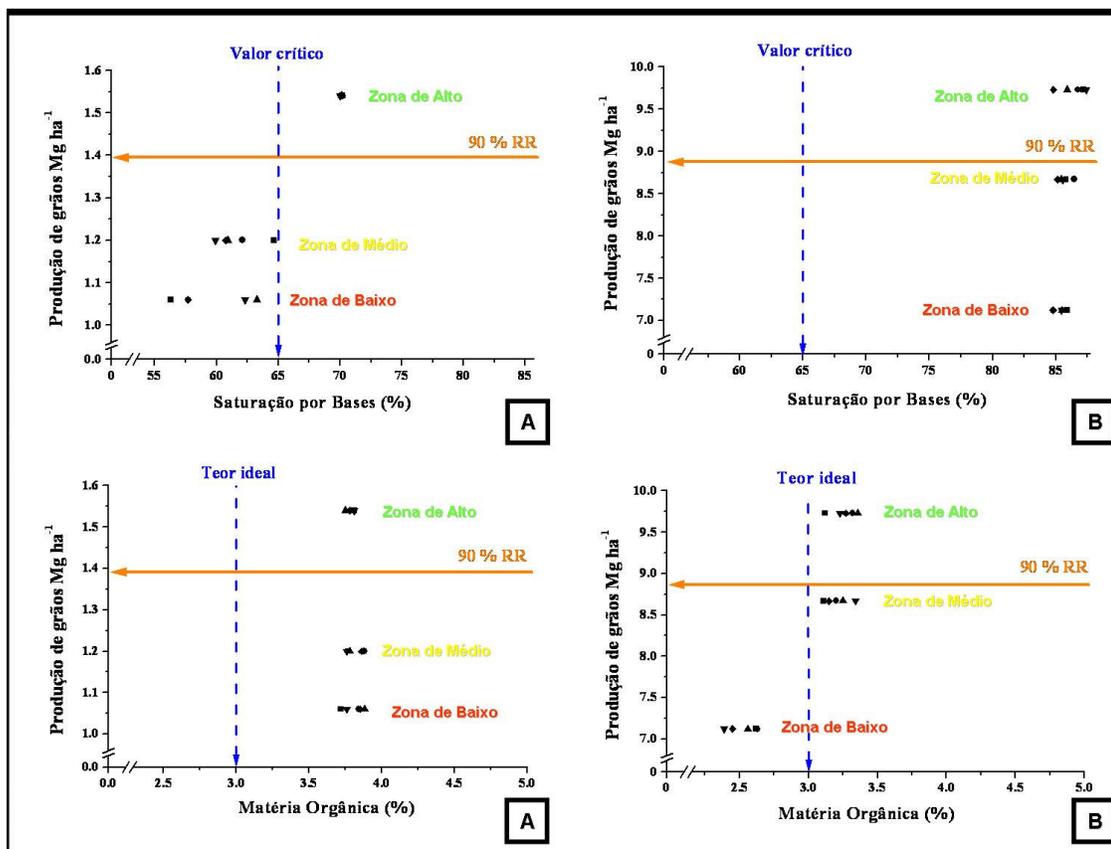
**Figura 7** – Relação entre o pH, alumínio, saturação por alumínio com o rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM), e o teor crítico proposto pela CQFS (2004) nas três zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

Os valores de pH apresentaram um comportamento diferenciado entre seus valores e o valor crítico nas áreas estudadas. Em TS, na zona de baixo rendimento, o pH está abaixo de 5,5, considerado crítico CQFS, (2004) para a maioria das culturas comerciais, entretanto, em PM os valores estão bem acima do valor limite (Figura 7). Percebe-se que na área de TS, além da zona de baixo rendimento a zona de médio aproxima-se do valor crítico. Esses valores de pH em TS favorecem o aparecimento de alumínio, aumentando sua participação no complexo

de troca, o que se comprova nos gráficos da Figura 7. Os valores encontrados na zona de médio e, principalmente, na de baixo rendimento, diminuem a CTC ocupada por bases, a qual pode ser observada na Figura 8. No entanto, em PM, o pH não está restringindo a expressão do potencial produtivo, ao mesmo tempo em que não há a presença e nem a saturação por alumínio, revelando-se, assim, que outro(s) atributo(s) devem estar limitando a produtividade.

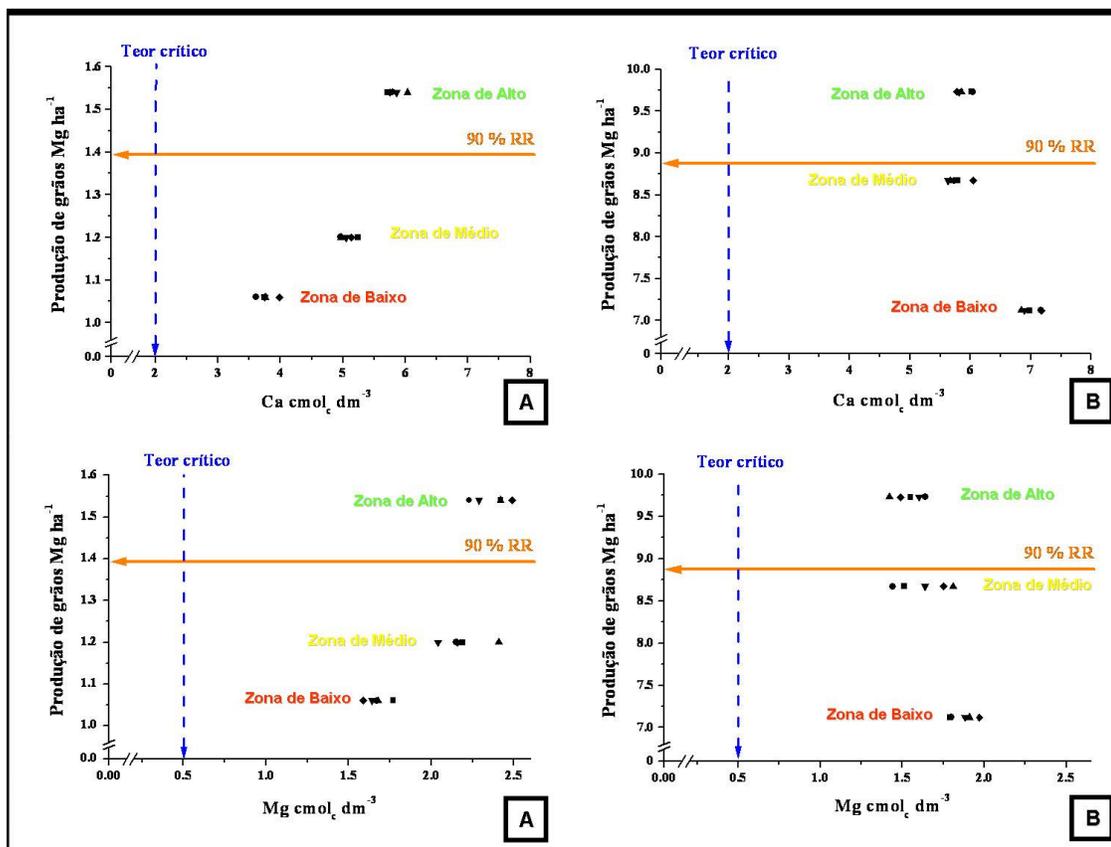
Dentre os atributos de solo avaliados, a matéria orgânica do solo (MOS) apresentou teores acima do crítico, com exceção da zona de baixo rendimento de PM, onde os valores ficaram próximos a 2,5 %.

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser utilizada como atributo chave de qualidade do solo (QS) (Doran & Parkin, 1994; Bezdicek et al., 1996), pois além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, auxiliando na infiltração, retenção de água e reduzindo a erosão (Gregorich et al., 1994). Ela também atua sobre outras propriedades críticas como ciclagem de nutrientes e estruturação do solo. Solos tropicais altamente intemperizados possuem baixa CTC (Hillel, 1980). Dessa forma, o teor de MOS tem importância preponderante no aumento da CTC efetiva desses solos (Peixoto, 1995; Bayer & Mielniczuk, 1999). Portanto, a contribuição da MO ocorre de forma direta e indireta sobre a qualidade do solo QS em regiões tropicais, estando em estreita relação com a maioria dos atributos (Doran, 1997).



**Figura 8** – Relação entre saturação por bases, CTC efetiva, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e o respectivo teor crítico proposto pela CQFS (2004), nas três zonas de rendimento estudadas das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

A Figura 9 expõe as correlações obtidas para os atributos de Ca e Mg para as áreas estudadas. Essa, revela que em TS e PM, todas s apresentam os teores de Ca e Mg acima do valor crítico proposto pela CQFS (2004), não oferecendo, assim, restrições ao rendimento da maioria culturas.

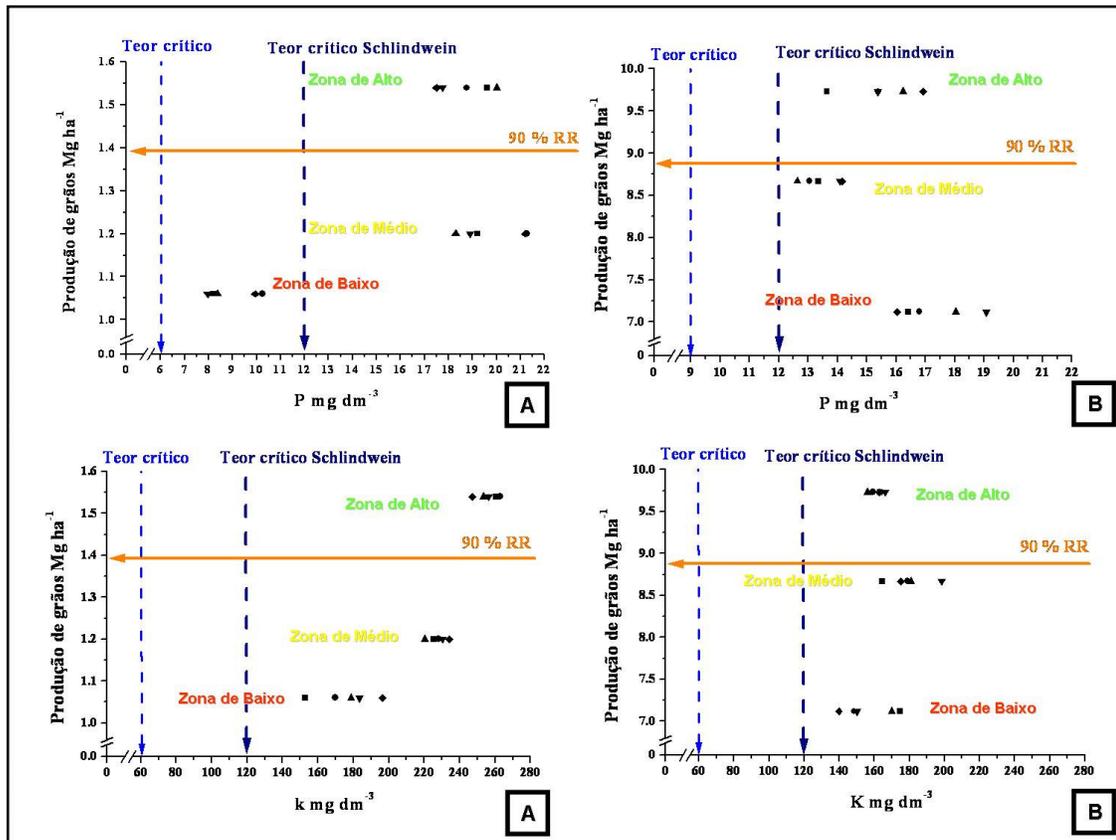


**Figura 9** – Relação entre cálcio e magnésio, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e o respectivo teor crítico proposto pela CQFS (2004), nas três zonas de rendimento estudadas das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

O fósforo e o potássio tiveram comportamentos distintos quanto aos teores encontrados nas zonas de rendimento para as áreas de TS e PM (Figura 10). Segundo CQFS, (2004), os teores encontram-se acima do crítico em ambas as áreas, indicando num primeiro momento não serem os atributos os limitantes do rendimento das zonas. Apesar dos teores estarem acima do nível crítico sugerido pela CQFS, (2004) o rendimento não alcança o rendimento relativo de 90 % (RR) com os teores encontrados nas zonas de médio e, principalmente, nas de baixo rendimento, em ambas as áreas. Não alcançando o RR de 90 %, há perda de eficiência no uso dos nutrientes e da água disponível, uma vez que não ocorrem restrições hídricas e de fertilidade nas áreas. Esse fato sugere que outros fatores podem estar limitando o rendimento das culturas.

Nas áreas irrigadas e com altos rendimentos (exportação), os teores críticos propostos pela CQFS, (2004) podem não estar adequados, subestimando os teores limitantes para este sistema de produção. Nesse sentido, a condição de fertilidade do solo encontrada nas zonas e áreas estudadas podem ser revistas, quando nos baseamos nos teores críticos propostos por

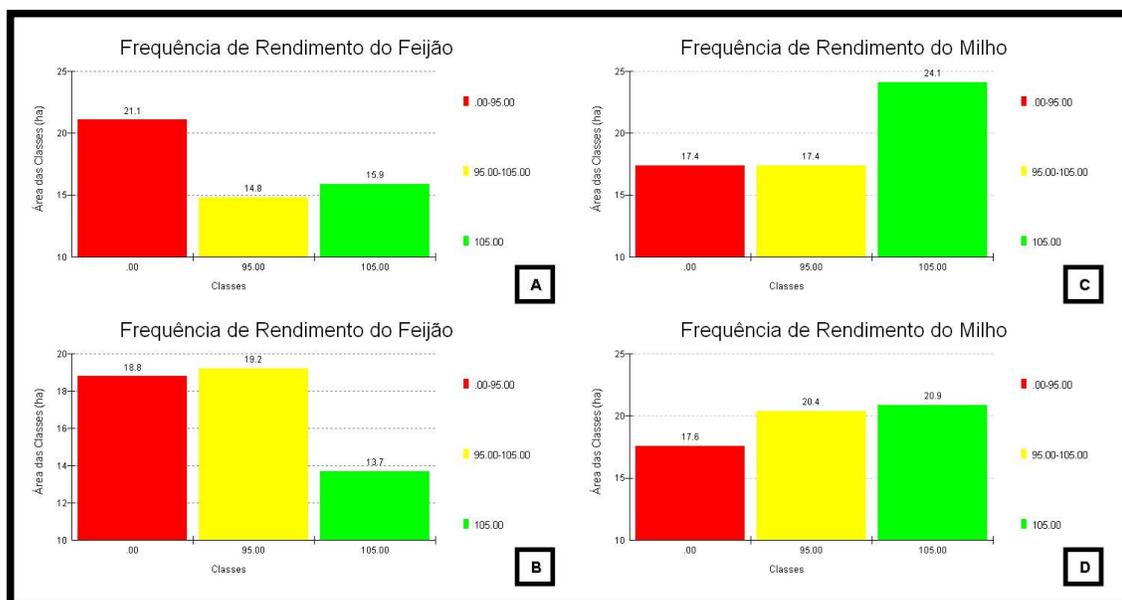
Schlindwein, (2003) para o sistema plantio direto, onde o crítico para potássio é de 120 mg  $\text{dm}^{-3}$  e o crítico para fósforo é de 12 mg  $\text{dm}^{-3}$ . Esses novos limites propostos trazem um segundo diagnóstico das zonas estudadas, as quais apresentam teores de P abaixo do crítico na zona de baixo rendimento em TS, e teores de K próximos ao limitante para PM. Logo, em TS, o K está abaixo do crítico somente na zona de baixo rendimento. Dessa maneira, os teores de P e K podem limitar o rendimento nessas zonas, em que os teores estão abaixo do crítico proposto por Schlindwein, (2003).



**Figura 10** – Relação entre fósforo e potássio, rendimento de grãos de feijão (TS) e milho (PM) e os respectivos teores críticos propostos pela CQFS (2004), Schlindwein (2003), nas três zonas de rendimento estudadas das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

A distribuição do rendimento seguindo as classes propostas por Molin, (2002) para safras estudadas, é apresentada na Figura 11. As safras obtiveram um índice de correlação entre os mapas de rendimento de 0,26 para TS e 0,39 para PM. Observa-se que os rendimentos não apresentaram estabilidade de rendimento, sendo necessário, assim, um conjunto maior de mapas de colheita para se obter maior segurança no diagnóstico.

O menor valor de correlação na área de TS pode ser atribuído ao cultivo da safrinha, onde as condições climáticas não são ideais ao desenvolvimento do feijoeiro, e à redução na utilização de insumos, principalmente fertilizantes, o que contribui para uma menor expressão do potencial produtivo. Pode-se perceber, ainda, uma maior expressão de rendimento na zona de alto em PM, onde na safra de 2002/03 alcançou 40,9 % da área, enquanto que na safra 2003/04 obteve 35,5%. Entretanto, na área de TS, a zona de baixo rendimento destacou-se por alcançar 40,7 % da área na safra 2005/2006 e 36,3% na safrinha 2006/06, o que reforça a hipótese da presença de limitadores de rendimento das culturas, como os indicadores químicos anteriormente citados (Figura 11).



**Figura 11** – Histograma de distribuição da frequência nas três zonas de rendimento, das áreas experimentais, safra de feijão 2005/2006 (A) e safrinha 2006/06 (B) em Trindade do Sul, RS, milho 2002/03 (C) e 2003/2004 (D) em Palmeira das Missões, RS.

### 5.5.2. Indicadores físicos do solo

A Tabela 2 apresenta os dados de textura das três zonas de rendimento nas áreas estudadas, Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

As três zonas de rendimento apresentaram diferenciação textural, tanto na área de TS, quanto na de PM. O conteúdo de areia total no solo foi maior na área PM, sendo que o maior valor 24,9 % encontra-se na zona de alto rendimento na camada 0 – 5 cm de profundidade. A

percentagem de areia total decresceu com o aumento da profundidade nas duas áreas estudadas e em todas as zonas, mas apresentou um comportamento diferenciado entre as zonas de rendimento, onde os menores valores ocorrem na zona de baixo rendimento na área de PM, e em TS eles ocorrem na zona de médio, com exceção da camada de 0,1 – 0,2 m.

O conteúdo de argila apresentou maiores percentagens na área de TS, onde os maiores valores ocorreram na zona de baixo rendimento, e os menores na zona de alto rendimento. Na área de PM, a argila é encontrada em percentagens menores na zona de baixo rendimento. A densidade de partículas (Tabela 2) apresentou variações nas diferentes zonas, com maior valor na zona de baixo rendimento e um crescimento à medida que aumenta a profundidade do solo na área de TS, com exceção da camada 0,1-0,2 m na zona de baixo rendimento. A variação dos valores de areia, silte e argila nas diferentes profundidades das zonas de rendimento não foi capazes de modificar a classe textural dos solos.

**Tabela 2** – Média da produção de grãos, textura e densidade de partícula, avaliados nas zonas de rendimento – Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Variável	Zonas de rendimento/ Áreas experimentais <sup>(1)</sup>						
	Baixa		Média		Alta		
	TS	PM	TS	PM	TS	PM	
Produção de feijão em TS e Milho em PM <sup>(2)</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	1,06	7,12	1,20	8,67	1,54	9,73	
Profundidade (m)							
Areia total (%)	0 – 0,05	8,07	16,38	5,62	20,20	8,58	24,90
	0,05 – 0,1	7,64	15,43	7,46	19,73	8,44	23,65
	0,1 – 0,2	6,53	14,68	9,50	19,53	8,45	22,95
Areia grossa (%)	0 – 0,05	2,79	5,65	1,97	9,10	3,27	13,45
	0,05 – 0,1	2,39	4,73	2,46	9,00	2,84	11,80
	0,1 – 0,2	2,33	4,05	3,46	9,28	2,89	10,68
Areia fina (%)	0 – 0,05	5,28	10,73	3,65	11,10	5,31	11,45
	0,05 – 0,1	5,25	10,70	5,06	10,73	5,60	11,85
	0,1 – 0,2	4,20	10,63	6,04	10,25	5,56	12,28

Silte (%)	0 – 0,05	28,04	26,64	34,54	21,28	27,80	17,58
	0,05 – 0,1	29,37	26,10	26,92	19,67	31,22	17,04
	0,1 – 0,2	31,58	26,04	28,03	19,23	30,02	15,71
Argila (%)	0 – 0,05	63,89	56,99	59,84	58,52	63,62	57,52
	0,05 – 0,1	62,99	58,48	65,62	60,60	60,34	59,31
	0,1 – 0,2	61,59	59,28	62,47	61,24	61,53	61,34
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	0 – 0,05	2,70	2,76	2,65	2,85	2,68	2,77
	0,05 – 0,1	2,72	2,82	2,69	2,80	2,69	2,65
	0,1 – 0,2	2,59	2,80	2,70	2,81	2,72	2,69

(<sup>1</sup>) Áreas experimentais, TS – Trindade do Sul e PM – Palmeira das Missões – RS;

(<sup>2</sup>) Médias de duas safras, TS - 2005/06 (safra) e 2006/ 06 (safrinha) e, PM safras 2002/03 e 2003/04.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados de densidade e resistência à penetração das duas áreas estudadas. PM apresentou maiores densidades nas camadas de 0,05 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m na zona de baixo e médio rendimento, resultados esses coerentes com a resistência à penetração obtida. Já em TS, o valor mais elevado de densidade foi observado na zona de médio rendimento, restringindo-se mais à sub-superfície, na qual a densidade foi de 1,32 g cm<sup>-3</sup> (Tabela 3). Do mesmo modo, as demais zonas de TS apresentaram a mesma tendência de acréscimo de densidade com o aumento da profundidade do solo.

Valores de densidade do solo superiores a 1,52 g cm<sup>-3</sup> causaram inibição do crescimento radicular de plantas de soja em um solo de textura média (Fernandez et al., 1995). Maria et al. (1999), ao estudar a influência da densidade do solo no sistema radicular em um Latossolo Roxo, encontrou restrição ao desenvolvimento radicular com densidade do solo superior a 1,2 g cm<sup>-3</sup>, quando o mesmo encontrava-se na capacidade de campo. Como os valores médios de densidade de solos arenosos são, naturalmente, maiores do que os valores de solos argilosos, deve-se evitar a utilização do valor absoluto da densidade para avaliar o estado de compactação de um solo, utilizando-se o teor de argila como referência (Reinert et al., 2001).

Reinert et al., (2001); Secco, (2003); Silva, (2003), propõem os seguintes valores críticos de densidade do solo, caracterizando um solo como compactado: 1,45 g cm<sup>-3</sup> para solos com mais de 55% de argila; 1,55 g cm<sup>-3</sup> para solos entre 20 e 55% de argila e, 1,65 g

cm<sup>-3</sup> para solos com menos de 20% de argila. Ao mesmo tempo, o limite crítico para resistência mecânica à penetração (RP) é de 2 Mpa.

Ao se observar os dados de densidade e resistência à penetração das áreas e zonas estudadas, pode-se inferir que PM tem tendência a apresentar problemas quanto à compactação do solo, principalmente na sub-superfície das zonas de baixo e médio rendimento, os quais estão se aproximando dos limites críticos citados pela literatura. Vale lembrar que, em PM, o solo apresenta-se com umidade inferior à área de TS, fato que contribuiu para aumento da resistência à penetração.

**Tabelas 3** – Médias da produção de grãos, densidade e resistência à penetração, avaliadas nas três zonas de rendimento – Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Variável	Zonas de rendimento/ Áreas experimentais <sup>(1)</sup>						
	Baixa		Média		Alta		
	TS	PM	TS	PM	TS	PM	
Produção de feijão em TS e Milho em PM <sup>(2)</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	1,06	7,12	1,20	8,67	1,54	9,73	
	Profundidade (m)						
	0 – 0,05	1,15	1,35	1,21	1,31	1,20	1,22
Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	0,05 – 0,1	1,19	1,37	1,18	1,36	1,16	1,27
	0,1 – 0,2	1,27	1,42	1,32	1,38	1,21	1,31
	0,05	0,36	0,26	0,26	0,13	0,08	0,06
RP (MPa)	0,1	1,04	1,73	0,55	1,17	0,41	0,83
	0,2	1,29	2,36	1,14	2,15	0,82	1,95
	0,3	1,24	2,35	1,30	2,18	0,94	2,01
	5	0,36	0,27	0,35	0,26	0,35	0,28
Umidade (g g <sup>-1</sup> )	10	0,30	0,32	0,33	0,32	0,33	0,34
	20	0,33	0,34	0,32	0,37	0,31	0,39
	30	0,35	0,33	0,32	0,36	0,32	0,38

<sup>(1)</sup> Áreas experimentais, TS – Trindade do Sul e PM – Palmeira das Missões – RS;

<sup>(2)</sup> Médias de duas safras, TS - 2005/06 (safra) e 2006/06 (safrinha) e, PM safras 2002/03 e 2003/04.

O sistema plantio direto (SPD) é uma técnica eficiente no controle das perdas de solo e água, motivo pelo qual vem sendo adotado por um número cada vez maior de agricultores.

Com a adoção do SPD, ocorrem modificações das condições do solo em taxas e direções diferentes das observadas nos sistemas de manejo do solo que incluem a sua mobilização. Contudo, o grau com que o SPD altera as propriedades físicas é muito variável e ainda pouco conhecido, geralmente pela grande variação de solos e clima onde ela é usada, além da grande variação de operações, tamanho de equipamentos e tipos de culturas nas mais diversas regiões e propriedades agrícolas (Reichert et al., 2003).

O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas cada vez mais pesados pode modificar as propriedades do solo, em relação àquelas encontradas no seu estado natural. Têm sido detectadas camadas compactadas subsuperficiais causadas pelo intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que provocam pressões na superfície do solo (Mantovani, 1987), afetando a sua densidade (Moraes & Benez, 1996), degradando a macroestrutura e reduzindo o grau de floculação da argila (Prado & Centurion, 2001). Esse processo pode ocorrer em áreas de cultivo intensivo sem os devidos cuidados no manejo do sistema, como é o caso das áreas irrigadas, cujas práticas de cultivo nem sempre são realizadas com o devido cuidado com a umidade do solo.

A Tabela 4 apresenta os dados de macro e microporosidade e porosidade total, as quais tiveram um comportamento distinto nas áreas, bem como entre as zonas em estudo. Ao mesmo tempo, os dados vêm confirmar a hipótese de que modificações físicas do solo podem limitar o rendimento das culturas, em especial na área de PM, onde se obteve maiores valores de densidade do solo e, ao mesmo tempo, um menor valor de macroporosidade. Esses resultados indicam a existência de problemas relacionados ao manejo dos solos, os quais podem afetar, de alguma forma, os atributos físicos, contribuindo assim, na redução do potencial produtivo das culturas.

Os dados revelam ainda que a área de PM possui menores valores de macroporosidade nas três zonas de rendimentos, confrontados com os de TS. Os menores valores encontram-se na zona de baixo rendimento, a qual possui somente 8 % de macroporosidade na camada de 0,1 a 0,2 m (Tabela 4). Em relação a macroporosidade, Reinert et al. (2001) afirmaram que o suprimento de oxigênio para as raízes é crítico quando o espaço aéreo do solo é de, aproximadamente, 10%, implicando na falta de oxigênio às raízes. No entanto, existem culturas que exigem espaço aéreo superior a 10% e outras que se desenvolvem com aeração inferior a essa mesma percentagem.

**Tabela 4** – Médias de macroporosidade, microporosidade e produção de grãos, avaliados nas zonas de rendimento em Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Variável	Zonas de rendimento/ Áreas experimentais <sup>(1)</sup>						
	Baixa		Média		Alta		
	TS	PM	TS	PM	TS	PM	
Produção de feijão em TS e Milho em PM <sup>(2)</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	1,06	7,12	1,20	8,67	1,54	9,73	
Profundidade (m)							
Macroporosidade (%)	0 – 0,05	31,17	10,63	30,39	10,69	29,65	13,97
	0,05 – 0,1	25,26	9,77	21,64	10,25	21,63	12,51
	0,1 – 0,2	14,67	8,00	17,31	10,67	16,27	11,97
Microporosidade (%)	0 – 0,05	35,75	47,27	36,63	46,60	38,47	45,26
	0,05 – 0,1	39,04	46,14	41,20	45,62	37,67	44,70
	0,1 – 0,2	33,37	48,91	43,87	41,02	44,22	43,32
Porosidade Total (%)	0 – 0,05	66,92	57,90	67,02	57,29	68,12	59,23
	0,05 – 0,1	64,30	55,91	62,84	55,87	59,30	57,21
	0,1 – 0,2	48,04	56,91	61,18	51,69	60,49	55,29

<sup>(1)</sup> Áreas experimentais, TS – Trindade do Sul, RS e PM – Palmeira das Missões, RS;

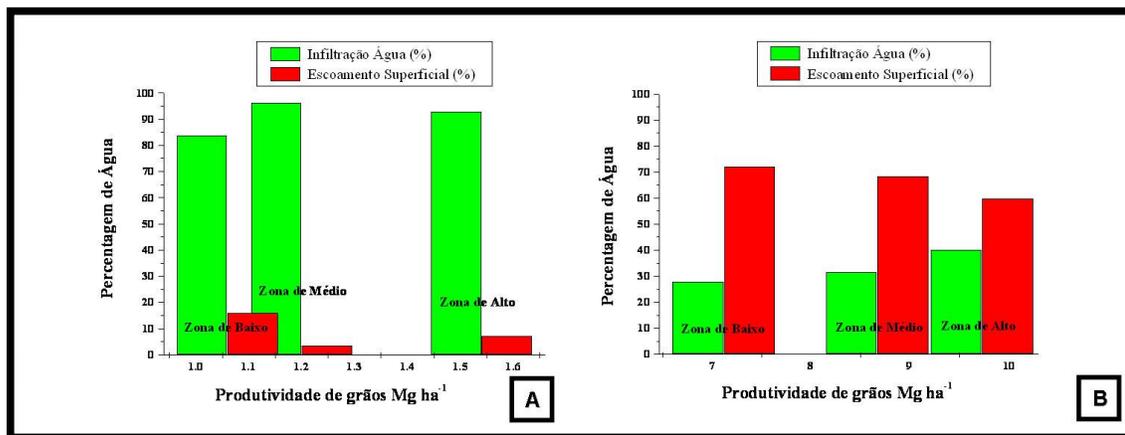
<sup>(2)</sup> Médias de duas safras, TS - 2005/06 (safra) e 2006/06 (safrinha) e, PM safras 2002/03 e 2003/04.

No SPD, o revolvimento do solo é restrito à linha de semeadura, mas o tráfego ocorre normalmente em toda extensão da área, resultando em um aumento da compactação do solo, principalmente na superfície. Esta hipótese é suportada por Vieira (1981), Vieira & Muzilli (1984) e Corrêa (1985), os quais descrevem que o SPD tem-se caracterizado por apresentar, na camada de 0 a 0,2 m de profundidade, maior estabilidade estrutural, maior densidade do solo, menores porosidades totais e macroporosidade, em comparação com outros sistemas de preparo do solo. Os dados apresentados na Tabela 5 mostram que, com o aumento da profundidade, ocorre diminuição da macroporosidade e aumento da densidade e também da resistência à penetração.

Os dados da Figura 12 mostram que os valores de infiltração de água no solo das zonas de baixo rendimento foram menores, ao mesmo tempo em que é verificada uma maior

taxa de escoamento superficial, decorrente das condições físicas encontradas nessas zonas citadas, para ambas as áreas. Esses dados revelam que os menores valores de infiltração de água nas zonas citadas contribuem para obtenção de menores produtividades. Tais resultados estão de acordo com Carduro & Dorfman (1988), que relatam que condições como porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal, rugosidade superficial e declividade do terreno, dentre outras, influem grandemente na infiltração da água no solo. Reichert et al. (1992) afirma que a textura do solo afeta o salpico de partículas provocado pelo impacto das gotas de chuva, contribuindo para uma redução da porosidade da camada superficial do solo.

Bertol et al. (2001) também descrevem que, em solos intensamente cultivados, o surgimento de camadas compactadas determina a diminuição do volume de poros ocupado pelo ar e o aumento na retenção de água. Em decorrência disso, observou-se pelos autores a diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão.

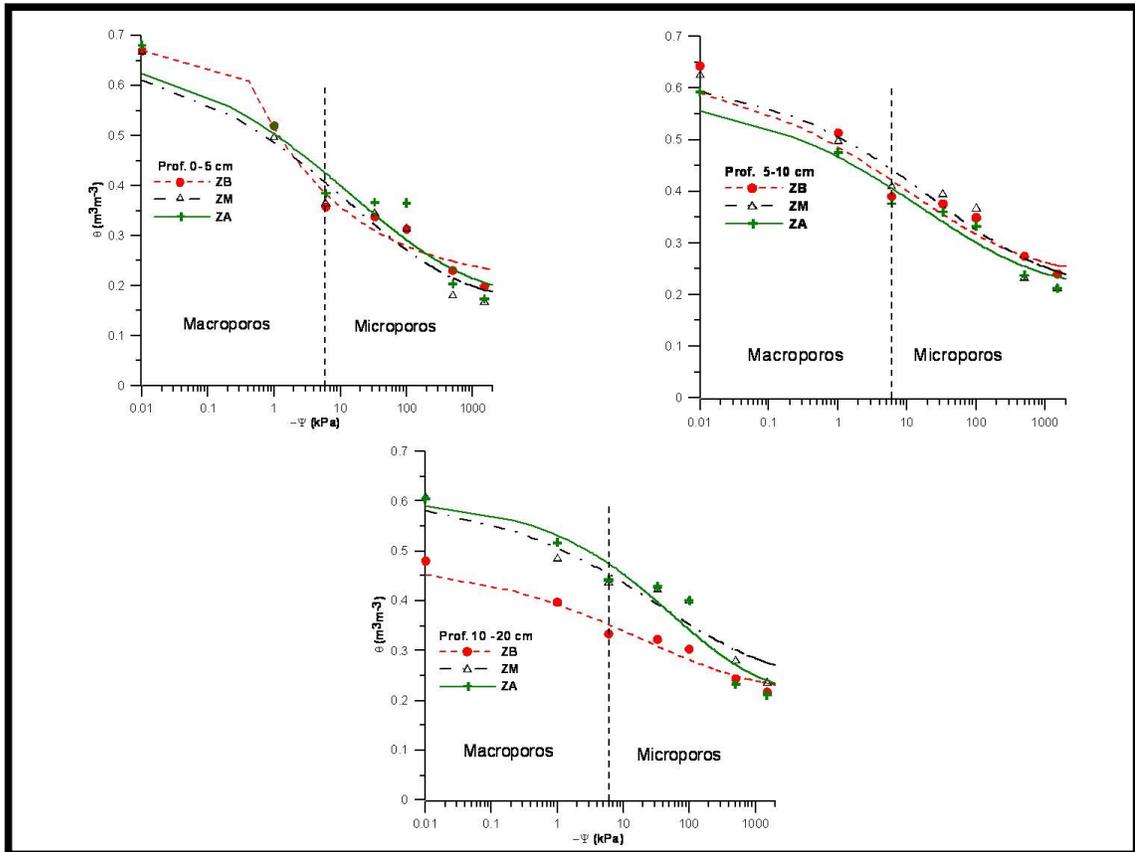


**Figura 12** – Histograma da infiltração de água no solo e do escoamento superficial obtidos, através do Cornell Sprinkle Infiltrimeter nas zonas de rendimento estudadas, das áreas experimentais (A) Trindade do Sul, RS e (B) Palmeira das Missões, RS.

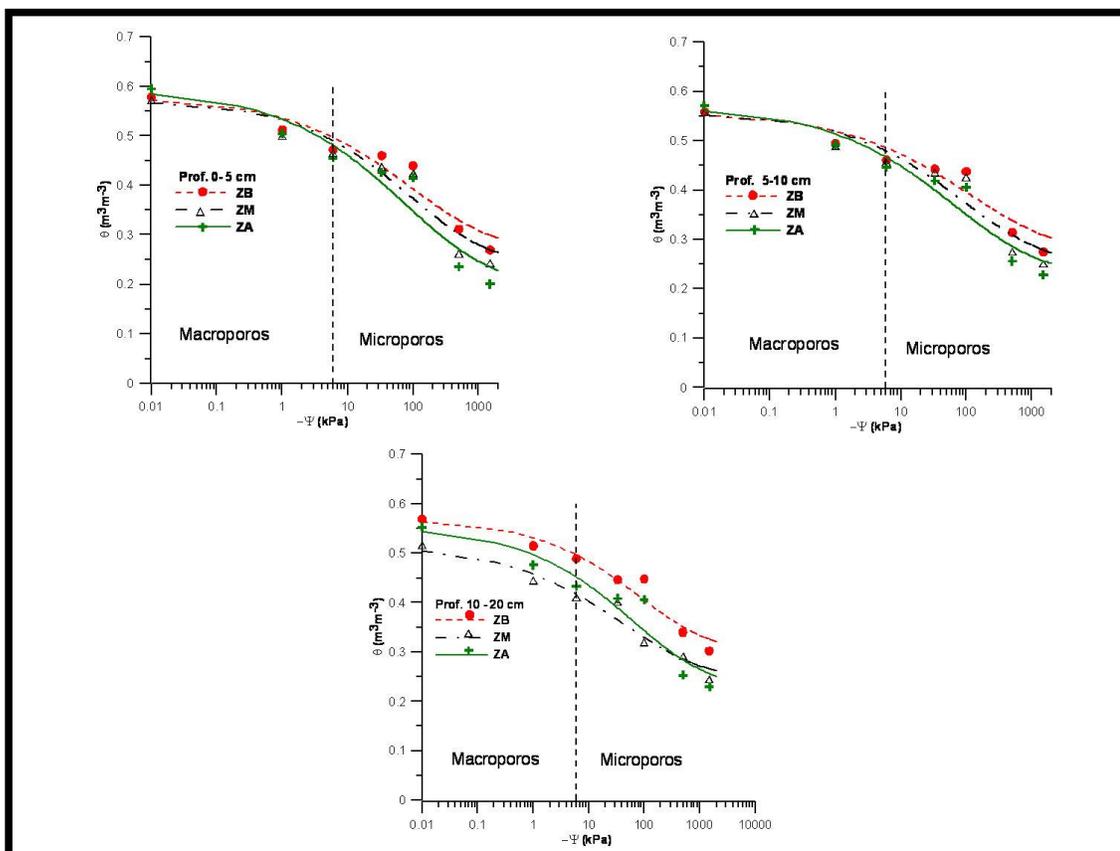
Nas Figuras 13 e 14, são apresentadas as curvas de retenção de água no solo para as zonas de rendimento estudadas, ajustadas segundo o modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980).

Os resultados apontam não haver alterações expressivas na curva de retenção entre as camadas das zonas de rendimento estudadas nas áreas de TS e PM, com exceção da camada de 0,1-0,2 m da área de TS, a qual apresentou menor conteúdo de água na zona de baixo

rendimento para as tensões aplicadas. Esse resultado indica que a produtividade da zona de baixo rendimento está sendo influenciada por um menor conteúdo de água no solo.



**Figura 13** – Curvas de retenção de água no solo para as três zonas de rendimento estudadas, na área experimental em Trindade do Sul, RS.



**Figura 14** – Curvas de retenção de água no solo para as três zonas de rendimento estudadas, na área experimental em Palmeira das Missões, RS.

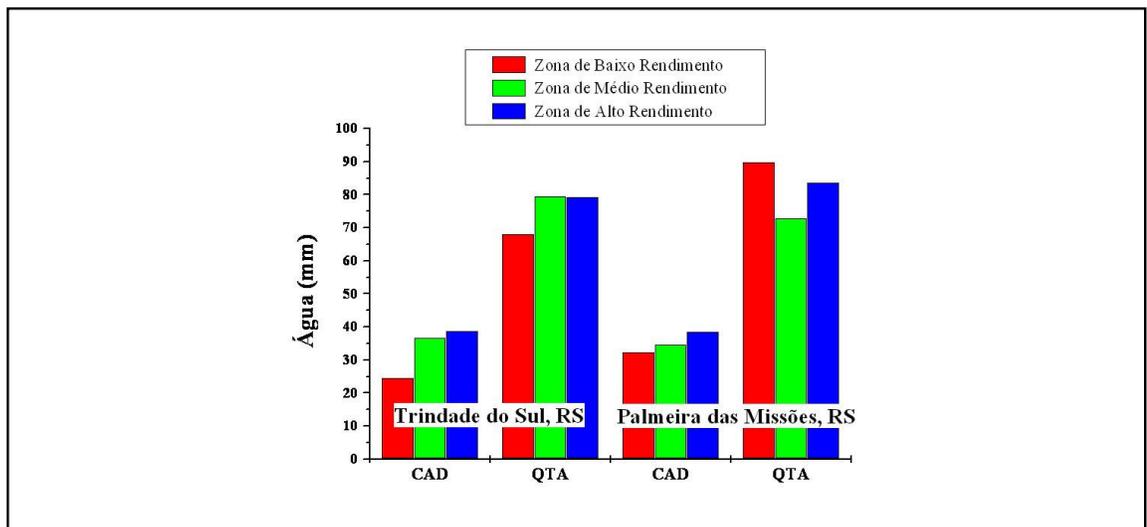
Dentre as informações obtidas pelas curvas de retenção de água, destacam-se a capacidade de água disponível (CAD) e a quantidade total de água armazenada (QTA), importantes para o crescimento radicular, para as reações químicas para o movimento e absorção de nutrientes e, conseqüentemente, para produção das culturas. A CAD corresponde à diferença entre o conteúdo de água retido na capacidade de campo de  $-0,006$  MPa (Reichardt, 1988) e o ponto de murcha permanente de  $-1,5$  Mpa.

Nas Figuras 15 e (Tabelas 6 e 7 Anexos D e E), são apresentados os valores de CAD e de QTA das zonas estudadas para as duas áreas.

A zona de baixo rendimento apresentou a CAD 37,07 % menor que a zona de alto rendimento, para a área de TS. Já em PM verificou-se a mesma tendência, porém a redução foi menor, 16,06 %. Isso demonstra que na área de PM existe maior conteúdo de água disponível às plantas na zona de baixo rendimento em comparação com TS.

As alterações nas características químicas, físicas e biológicas do solo têm influência direta na quantidade de água disponível às plantas. Desse modo, em havendo qualquer restrição física, química ou biológica em alguma camada do perfil do solo, que altere o

desenvolvimento do sistema radicular, a disponibilidade será afetada porque essa água armazenada não pode ser extraída pelas plantas (Santos e Carlesso, 1998). Sendo assim, as zonas com diferentes capacidades de armazenamento de água, sinalizam que as plantas vão apresentar diferentes rendimentos. Exemplo disso são as zonas de baixo rendimento que possuem menor CAD em relação às zonas de alto, pois, à medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo para as plantas.



**Figura 15** – Histograma da capacidade de armazenamento de água e da quantidade de água total disponível no solo para as três zonas de rendimento estudadas na camada de 0-0,2 m, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e de Palmeira das Missões, RS.

### 5.5.3. Análise multivariada

Os dados químicos e físicos do solo e do rendimento das culturas nas zonas estudadas foram submetidos à análise multivariada, e seus dados são apresentados nas Tabelas 8 e 9 abaixo.

A análise de componentes principais das variáveis estudadas anteriormente, demonstra que as 31 variáveis originais foram capazes de explicar 81,37 e 80,03 % das variâncias totais dos dados, a partir de 4 e 5 componentes principais para a área de TS e PM, respectivamente.

O primeiro componente principal explica 46,44 % da variação original dos dados da área de TS (Tabela 5). As variáveis químicas que apresentaram correlação negativa elevada nesse primeiro componente foram o pH, P, K, Mg, Ca e a saturação por bases, enquanto que o

Al e a saturação por Al apresentaram correlações negativas. Dentre os dados de atributos físicos, a argila a 0,05-0,1 m, a microporosidade e a QTA, para a camada de 0,1-0,2 m, e a CAD, para as três camadas estudadas, apresentaram correlação positiva, diferente da resistência à penetração, que obteve valores negativos em ambas as camadas avaliadas. Esses resultados confirmam a hipótese do primeiro capítulo, no qual o primeiro componente foi interpretado como sendo “parâmetros da acidez”.

Os atributos físicos também explicam boa parte da variação ocorrida nas zonas de rendimento. Esses resultados podem ser evidenciados nos componentes 1, 2 e 3, onde alguns atributos físicos apresentam altos índices de correlação, indicando que as modificações provocadas pelo manejo do solo estão causando problemas físicos, os quais estão interferindo na capacidade de armazenamento de água, bem como na quantidade de água total armazenada das camadas estudadas. Isso está de acordo com Forsythe (1967), o qual relata que a água, o oxigênio, a temperatura e o impedimento mecânico afetam o crescimento de plantas nos diferentes estádios de desenvolvimento, relacionando-se com as propriedades do solo que afetam indiretamente as plantas.

**Tabela 5** – Análise de componentes principais das variáveis químicas e físicas do solo e produtividade na área experimental de Trindade do Sul, RS.

Componentes da variância	Componentes principais			
	1	2	3	4
Variância	14,80	5,28	3,37	2,18
Proporção (%)	46,44	17,03	10,87	7,03
Proporção acumulada (%)	46,44	63,47	74,34	81,37
Variáveis	Correlação com os componentes principais <sup>(1)</sup>			
Argila 0-0,05 m	- 0,19	- 0,04	- 0,64	- 0,49
Argila 0,05-0,1 m	<b>0,88</b>	0,27	- 0,22	- 0,05
Argila 0,1-0,2 m	0,18	- 0,09	0,27	0,63
pH H <sub>2</sub> O	<b>0,98</b>	0,14	- 0,04	- 0,05
Fósforo	<b>0,86</b>	0,27	0,33	0,20
Potássio	<b>0,91</b>	0,29	- 0,04	0,01
Matéria Orgânica	- 0,11	- 0,04	- 0,11	0,74
Alumínio	<b>- 0,79</b>	- 0,17	- 0,55	- 0,14
Magnésio	<b>0,93</b>	0,14	0,01	0,09
Cálcio	<b>0,94</b>	0,25	0,01	- 0,03
CTC – Efetiva	- 0,38	- 0,50	- 0,36	- 0,52
Saturação por Al	<b>- 0,88</b>	- 0,19	- 0,38	- 0,07
Saturação por Bases	<b>0,77</b>	0,20	- 0,40	- 0,01
Macroporosidade 0-0,05 m	- 0,15	0,90	- 0,04	- 0,17

Macroporosidade 0,5-0,1 m	- 0,48	0,69	- 0,29	0,10
Macroporosidade 0,1-0,2 m	- 0,43	- 0,06	- 0,09	0,15
Microporosidade 0-0,05 m	0,44	<b>- 0,83</b>	- 0,13	0,15
Microporosidade 0,5-0,1 m	0,02	0,67	0,52	- 0,12
Microporosidade 0,1-0,2 m	<b>0,75</b>	0,10	0,09	- 0,17
CAD 0-0,05 m	<b>0,83</b>	- 0,43	0,01	0,01
CAD 0,5-0,1 m	<b>0,82</b>	- 0,01	0,16	0,01
CAD 0,1-0,2 m	<b>0,96</b>	0,05	- 0,13	0,11
QTA 0-0,05 m	0,45	<b>- 0,84</b>	- 0,09	0,17
QTA 0,05-0,1 m	0,46	<b>- 0,76</b>	0,19	- 0,35
QTA 0,1-0,2 m	<b>0,76</b>	0,04	0,05	- 0,31
Densidade 0-0,05 m	- 0,26	0,17	<b>0,81</b>	- 0,40
Densidade 0,05-0,1 m	0,12	- 0,74	- 0,05	- 0,12
Densidade 0,1-0,2 m	- 0,27	0,18	<b>0,80</b>	- 0,41
RP 0,5-0,1 m	<b>- 0,93</b>	- 0,14	0,22	0,12
RP 0,1-0,2 m	<b>- 0,94</b>	- 0,21	- 0,14	- 0,06
RP 0-0,05 m	<b>- 0,86</b>	- 0,18	0,37	0,11

<sup>(1)</sup> Números em negrito visam destacar as variáveis originais com elevadas correlações (> |0,70|) com os componentes principais.

\* Limite arbitrado por Castro, (2004) e adotado neste trabalho.

Na Tabela 6, são apresentados os resultados da análise de componentes principais realizada na área de PM, onde cinco componentes principais explicam 87,03 % da variação total dos dados originais.

O primeiro componente é responsável por 33,79 % da variação total dos dados. A maioria das correlações das variáveis originais nessa área são negativas, com exceção do pH e da matéria orgânica (MO). A alta correlação da MO do solo (0,98) sugere que o seu incremento favorece o aumento da produtividade nas zonas de rendimento estudadas. A MO pode ser utilizada como indicador da qualidade do solo, pois além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, auxiliando na infiltração, retenção de água e reduzindo a erosão (Gregorich et al., 1994). Esse atributo pode ser uma das origens das baixas produtividades nas zonas de baixo rendimento.

Os índices de correlações do Mg, Ca e da CTC efetiva são negativos, diferente do pH, que é positivo, revelando assim, uma interessante relação entre as variáveis do componente, uma vez que os nutrientes referidos e o pH encontram-se acima dos níveis críticos sugeridos pela CQFS, (2004). Pode-se inferir que esses valores negativos sejam originados do excesso de calagem ou do desequilíbrio de bases. Entretanto, à primeira vista, não se encontram

razões óbvias para que essa situação ocorra, pois ela deve ter suas origens e relações com o rendimento das zonas estudadas melhor investigadas.

Os índices de correlação de atributos físicos dos componentes 1 a 5 revelam novamente a existência de uma interação física no rendimento das zonas estudadas, de maneira semelhante à encontrada na área de TS. Contudo, os índices de correlação são menores, indicando ser uma problemática de menor magnitude se comparada às zonas de rendimento de TS.

**Tabela 6** – Análise de componentes principais das variáveis químicas e físicas do solo, e produtividade na área experimental de Palmeira das Missões, RS.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Variância	9,80	5,48	3,53	2,87	2,53
Proporção (%)	33,79	15,45	12,17	9,90	8,72
Proporção acumulada (%)	33,79	49,24	61,41	71,31	80,03
Variáveis	Correlação com os componentes principais <sup>(1)</sup>				
Argila 0-0,05 m	0,67	0,19	- 0,20	0,48	- 0,11
Argila 0,05-0,1 m	0,34	<b>0,71</b>	- 0,24	0,46	0,18
Argila 0,1-0,2 m	0,65	- 0,28	0,35	- 0,33	0,29
pH H <sub>2</sub> O	<b>0,73</b>	0,30	- 0,14	- 0,40	0,16
Fósforo	- 0,68	- 0,46	0,19	- 0,16	- 0,22
Potássio	0,50	0,43	0,24	0,49	0,14
Matéria Orgânica	<b>0,98</b>	- 0,07	0,05	- 0,04	- 0,04
Alumínio	-	-	-	-	-
Magnésio	- <b>0,81</b>	0,27	0,01	- 0,03	0,11
Cálcio	- <b>0,94</b>	- 0,14	- 0,19	- 0,04	- 0,08
CTC – Efetiva	- <b>0,88</b>	- 0,18	- 0,28	0,07	0,17
Saturação por Al	-	-	-	-	-
Saturação por Bases	0,41	- 0,12	0,01	- 0,28	- 0,01
Macroporosidade 0-0,05 m	0,35	- 0,68	- 0,25	- 0,06	0,48
Macroporosidade 0,5-0,1 m	0,52	- 0,42	0,26	- 0,42	- 0,30
Macroporosidade 0,1-0,2 m	0,65	- 0,47	0,20	0,12	- 0,32
Microporosidade 0-0,05 m	- 0,31	0,66	0,23	- 0,11	- 0,56
Microporosidade 0,5-0,1 m	- 0,23	0,29	<b>0,72</b>	- 0,01	0,56
Microporosidade 0,1-0,2 m	- 0,51	- 0,11	0,51	0,19	- 0,29
CAD 0-0,05 m	0,11	0,47	0,23	- 0,54	- 0,44
CAD 0,5-0,1 m	0,28	0,23	<b>0,83</b>	- 0,25	0,22
CAD 0,1-0,2 m	0,33	- 0,50	0,51	0,41	- 0,09
QTA 0-0,05 m	- 0,59	0,65	0,17	- 0,21	- 0,37
QTA 0,05-0,1 m	- 0,32	0,32	0,67	- 0,01	0,58

QTA 0,1-0,2 m	- 0,48	- 0,39	0,39	0,45	0,02
Densidade 0-0,05 m	- 0,40	- 0,12	0,47	0,01	- 0,30
Densidade 0,05-0,1 m	- 0,35	0,07	- 0,36	- 0,58	0,32
Densidade 0,1-0,2 m	- 0,60	0,47	- 0,29	- 0,12	0,28
RP 0,5-0,1 m	- 0,56	0,03	- 0,09	0,62	- 0,10
RP 0,1-0,2 m	<b>- 0,80</b>	- 0,24	0,20	- 0,08	0,34
RP 0-0,05 m	- 0,68	- 0,58	- 0,06	- 0,23	- 0,10

---

<sup>(1)</sup> Números em negrito visam destacar as variáveis originais com elevadas correlações (> |0,70|) com os componentes principais.

---

\* Limite arbitrado por Castro, (2004) e adotado neste trabalho.

## **5.6. Conclusões**

Em TS, os problemas com a acidez, a disponibilidade de Ca e Mg e a presença de alumínio trocável estão entre os principais limitadores do rendimento das zonas estudadas.

As zonas de baixo rendimento em ambas as áreas apresentaram menores índices de fertilidade, bem como possuem limitações de ordem física do solo.

A capacidade de armazenamento de água no solo está sendo afetada em maior magnitude nas zonas de baixo rendimento para ambas as áreas, entretanto, o problema agrava-se em na TS.

As zonas baixo potencial produtivo de grãos possuem uma menor CAD, enquanto que as zonas de alto rendimento possuem uma maior CAD.

## 5.7. Referências bibliográficas

ACEVEDO, E.; HSIAO, T.C.; HENDERSON, D.W. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water status. **Plant Physiology**, v. 48, p. 631-636, 1971.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 717-723, 2001.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for as-sessing soil quality**. Madison: Soil Science So-ciety of America, 1996. p.123-141. (SSAA Spe-cial Publication, 49) .

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-39.

BERTOL, I.; *et al.* Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetado pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, v. 58, n.3, p. 555-560, 2001.

BEVEN, K.J.; Germann, R.F. Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research**, Washington, v.18, p.1311-1325, 1982.

BEZDICEK, D.F.; PAPENDICK, R.I.; LAL, R. Introduction: importance of soil quality to health and sustainable land management. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.1-8. (SSSA. Special publication, 49).

CARDURO, F.A.; Dorfman, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem**. Brasília: PRONI/MA, 1988. 216 p.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p.183-188, 1995.

CARVALHO, M.P. et al. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CASSEL, D.K. ; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In. KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison; America Society of Agronomy, 1986. p.901-926.

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

CHRISTOFIDIS, D. **Água**: gênese, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil. Brasília, 2005. 18 p.

CHRISTOFIDIS, D. **Seminário**: Desafios à expansão da agropecuária brasileira (ANA e agricultura sustentável). Brasília, 2006.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400 p.

CORRÊA, J.C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.20, n.11, p.1317-1322, nov. 1985.

DEMATTÊ, J.L.I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmido da região amazônica**. Campinas, Fundação Cargill, 1988. 215p.

DA ROS, C.O. et al.. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.2, p.241-247, 1997.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C.A. (ed.) **Methods of soil analysis**: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545-567, Pt.1.

DORAN, J.W. ; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. (Special publication, 35)

DORAN, J.W., Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, v. 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

EMBRAPA- Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária de Solos (Rio de Janeiro). **Manual de Métodos de análise de solo** -2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

\_\_\_\_\_ 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.

\_\_\_\_\_ Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1979. v.1.

FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.C.C., THIMOTEO, C.M.S. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, v. 23, n. 1, p. 117-132, 1995,

FORSYTHE, W.M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latinoamericana**. v.4, n.2, 1967.

GIOTTO, L; ROBAINA, A. D. ; SULZBACH, L. **A agricultura de precisão como o Sistema CR Campeiro**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural, 2004. 330 p.

GRANT, C.A.; LANFOND, G.O. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, v.73, n.2, p.223-232, 1993.

GREGORICH, E.G.; *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Can. J. Soil Sci.**, 367-375, 1994.

HILLEL, D. Internal drainage and redistribution following infiltration. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York : Academic, 1980. p.50-72.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic Press, 1982. 264 p.

HILLEL, D. **Solo e Água**; fenômeno e princípios físicos. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS, 1970. 231p.

KERTZMANN, F.F. Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação. São Paulo, SP, 1996. 153f. Tese (Doutorado em Geografia Física), Universidade de São Paulo, 1996, São Paulo.

KLEIN, V.A., LIBARDI, P.L., SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, 1998.

LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.43, p.107-53, 1990.

MACHADO, R.V. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrossequência de solos bem a muito mal drenados**. 1994. 88p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1994.

MANTOVANI, E. C. **Máquinas e implementos agrícolas**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 23, n. 1, p. 56-63, 1987.

MARIA, I.C. de, CASTRO O.M., DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n. 03, p.703-709, 1999.

MENEGATTI, L.A.A. Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade. Piracicaba, 2002, 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MEROTTO JUNIOR, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v.17, n.2, p.97-107, 1997.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**. v. 22, n.1, p.83-92, 2002.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, v. 16, n. 2, p. 31-41, 1996.

OLIVEIRA, G.C. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado.2002, 78 p: Tese (Doutorado em Agronomia ) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesq. Agropec. Bras.** v. 39, p. 197-200, 1968.

PRADO, R. M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 197-203, jan. 2001.

PEIXOTO, R.T.G.; TRAINA, S.J.; BIGHAM, J.M. Aplicabilidade do método de adsorção de Cs na determinação de carga elétrica permanente em Latossolos derivados de basalto no Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. **Resumos Expandidos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995a.. p.295-297, v.1.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; *et al.* Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 965-973, jul. 2001.

REINERT, D.J., REICHERT, J.M. ; SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; *et al.* eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001, 165p.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil science**, Madison, v. 58, , p.95-112, 1949

SANAEI, A.; YULE, I. J. **Yield measurement reliability on combine harvesters**. St. Joseph: ASAE, 1996. 14 p. ( Paper, 96-1020).

SANTOS, R.F. & CARLESSO, R.. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Control of crop production. **Fertilizer Research**, v.33, p.1-34, 1992.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade das culturas**. Tese. (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Tese. (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van, (eds). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.1-21.

SOUZA, L.S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. Porto Alegre : 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Influência da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob o cultivo da cana-de-açúcar. **Irriga**, p.1-11, 2004.

TEDESCO, M.J.; *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. Ed.rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos,5)

TORMENA, C. A.; *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.4, p.795-801 2002.

VAN ES. H. ; SCHINDELBECK, R. **Field procedures and data analysis for the cornell Sprinkle Infiltrometer**. Cornell University, Department of Crop and Soil Sciences. extension publication R 03-01. 8 pages.

VAN GENUCHTEN, M.T.H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1981. p.19-32. (IAPAR. Circular: 23).

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.19, n.7, p.873-882, jul. 1984.

WANG, J.; Hesketh, J.D.; Woolley, J.T. Preexisting channels and soybean rooting patterns. **Soil Science**, v.141, p.432-437, 1986.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1989.

## **5.8. Anexos**

**ANEXO A** – Detalhes do penetrômetro digital manual (marca DLG, modelo PNT 2000), utilizado na determinação da resistência à penetração nas três zonas de rendimento estudadas, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.



**ANEXO B** – Detalhes do Cornell Sprinkle Infiltrometer utilizado na determinação da infiltração e escoamento superficial de água, para as três zonas de rendimento estudadas, nas áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e em Palmeira das Missões, RS.



**ANEXO C** – Parâmetros da equação de Van Genuchten, utilizados para o ajuste das curvas de retenção de água no solo das áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Área de estudo	Zona de Rendimento	Prof. m	Parâmetros da equação de van Genuchten					
			$\alpha$	m	n	$\frac{\square_r}{\square_s}$	$\frac{\square_r}{\square_s}$	R <sup>2</sup>
			$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$					
TS <sup>1</sup>	Baixo	0-0,95	3,7310	0,0704	4,2603	0,199	0,670	0,974
		0,05-0,1	0,0001	6,9002	0,2824	0,240	0,643	0,973
		0,1-0,2	0,0003	4,5863	0,2948	0,216	0,480	0,971
	Médio	0-0,95	0,00005	7,9688	0,2855	0,169	0,670	0,968
		0,05-0,1	0,0003	4,5763	0,3120	0,215	0,628	0,955
		0,1-0,2	0,0003	3,9542	0,3004	0,238	0,612	0,938
	Alto	0-0,95	0,0003	4,7294	0,2893	0,174	0,681	0,949
		0,05-0,1	0,0003	4,9221	0,3032	0,212	0,593	0,971
		0,1-0,2	0,0004	4,3624	0,3873	0,211	0,605	0,934
PM <sup>2</sup>	Baixo	0-0,95	0,0004	3,9416	0,4158	0,269	0,579	0,930
		0,05-0,1	0,0003	3,9061	0,4021	0,275	0,559	0,920
		0,1-0,2	0,0004	4,0942	0,4192	0,302	0,569	0,948
	Médio	0-0,95	0,0004	4,2849	0,4414	0,243	0,573	0,925
		0,05-0,1	0,0004	4,1239	0,4275	0,252	0,559	0,916
		0,1-0,2	0,0004	4,3326	0,3627	0,246	0,517	0,962
	Alto	0-0,95	0,0004	4,1074	0,4053	0,201	0,595	0,927
		0,05-0,1	0,0004	4,2339	0,3985	0,229	0,572	0,935
		0,1-0,2	0,0004	4,1880	0,3930	0,230	0,553	0,919

<sup>1</sup> TS – Trindade do Sul, RS;

<sup>2</sup> PM- Palmeira das Missões, RS.

**ANEXO D** – Limites superior e inferior de disponibilidade de água, capacidade de armazenamento de água às plantas no solo das áreas experimentais de Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

Variável	Área experimental/ Zonas de Rendimento		
	Zona de Baixo	Zona de Médio	Zona de Alto
<b>Camada de 0 – 5 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,338	0,347	0,367
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,199	0,169	0,174
CAD (mm) camada 0-5 cm	6,95	8,90	9,65
<b>Camada de 5 – 10 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,376	0,396	0,360
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,240	0,215	0,212
CAD (mm) camada 5-10 cm	6,80	9,05	7,40
<b>Camada de 10 – 20 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,323	0,425	0,429
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,216	0,238	0,211
CAD (mm) camada 10-20 cm	10,70	18,70	21,80
<b>Armazenamento total</b>			
CAD (mm)	24,45	36,65	38,85
QTA (mm)	68,00	79,65	79,25

$L_S$  = Limite superior de disponibilidade de água às plantas;  $L_I$  = Limite inferior de disponibilidade de água às plantas; CAD = Capacidade de armazenamento de água disponível às plantas; QTA = Quantidade total de armazenamento de água no solo.

**ANEXO E** – Limites superior e inferior de disponibilidade de água, capacidade de armazenamento de água às plantas no solo das áreas experimentais de Palmeira das Missões, RS.

Variável	Área experimental/ Zonas de Rendimento		
	Zona de Baixo	Zona de Médio	Zona de Alto
<b>Camada de 0 – 5 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,461	0,438	0,426
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,269	0,243	0,201
CAD (mm) camada 0-5 cm	9,60	9,75	11,25
<b>Camada de 5 – 10 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,443	0,436	0,420
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,275	0,252	0,229
CAD (mm) camada 5-10 cm	8,40	9,20	9,55
<b>Camada de 10 – 20 cm</b>			
$L_S$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,446	0,402	0,408
$L_I$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,302	0,246	0,230
CAD (mm) camada 10-20 cm	14,40	15,60	17,80
<b>Armazenamento total</b>			
CAD (mm)	32,40	34,55	38,60
QTA (mm)	89,80	72,95	83,60

$L_S$  = Limite superior de disponibilidade de água às plantas;  $L_I$  = Limite inferior de disponibilidade de água as plantas; CAD = Capacidade de armazenamento de água disponível as plantas; QTA = Quantidade total de armazenamento de água no solo.

## 6. CAPÍTULO III: VARIABILIDADE DO RENDIMENTO E SEU REFLEXO NA RENTABILIDADE DE ÁREA IRRIGADA E DE SEQUEIRO.

### Resumo

A variabilidade da rentabilidade dos cultivos está intimamente ligada à heterogeneidade existente no solo. As informações da variabilidade do solo e do rendimento permitem ao administrador planejar com um maior grau de certeza, pois o mesmo é amparado por uma maior quantidade e qualidade de informações no processo decisório. As ferramentas que a agricultura de precisão dispõe, além de indicar o local exato da alocação de insumos agrícolas de forma eficiente, são capazes também de advertir as subáreas onde o lucro está sendo reduzido por um fator a ser investigado. Esse gerenciamento detalhista proporcionado pela agricultura de precisão torna-se de suma importância em sistemas de produção nos quais os custos envolvidos e a intensidade de cultivos são aumentados, como é o caso das lavouras irrigadas. Nesse sentido, este trabalho busca caracterizar, quantificar e avaliar a variabilidade da rentabilidade dos cultivos irrigados, confrontado com os de sequeiro. Tal estudo foi conduzido em duas lavouras comerciais, no município de Palmeira das Missões (PM), no qual as lavouras estudadas perfazem 57 e 58 ha de sequeiro e irrigados com pivô central, respectivamente. As informações de precipitação foram obtidas a partir dos históricos da propriedade em PM. As safras estudadas foram 2001/02 e 2004/05 sequeiro, e 2002/03 e 2003/04 irrigado. Os dados de rendimento foram obtidos a partir de uma colhedora MF 34 equipada com sistema Fieldstar<sup>®</sup> de agricultura de precisão. Os pontos de colheita georeferenciados sofreram um processo de diminuição da densidade de pontos, denominados células. Primeiramente, os dados foram submetidos à análise de estatística básica, a fim de avaliar a variabilidade existente no conjunto de dados. Posteriormente, os dados de rendimento e os econômicos foram utilizados na análise de rentabilidade por classes de rendimento para cada lavoura estudada. O coeficiente de variação dos dados de rendimento foi de 17,38 a 27 % na área de sequeiro para as safras 2001/02 e 2004/05, respectivamente. Entretanto, na área irrigada, o CV foi de 14,99 % na safra 2002/03 e 13,04 % na safra 2003/04. O cultivo de sequeiro obteve um custo médio de US\$ 373,53 ha<sup>-1</sup>, enquanto que o irrigado obteve custo de US\$ 415,66 ha<sup>-1</sup>. O retorno de cada dólar investido foi de 2,27 kg a mais na lavoura irrigada, comparada à de sequeiro. Os dados econômicos indicam que a área irrigada possui um ganho de rentabilidade na ordem de 19,7 % superior à lavoura cultivada em sequeiro.

Palavras-chave: variabilidade de rendimento, irrigação; rentabilidade; retorno econômico.

## 6.1. Introdução

A eficiência na alocação de recursos produtivos constitui-se no objetivo natural de todo o indivíduo ou empresa que se dedica à produção de determinado bem, a partir de recursos limitados. Na agricultura, essa alocação é dificultada pela incerteza, pois não é possível controlar todas as variáveis envolvidas na produção, tornando assim a agricultura uma atividade de “riscos constantes”.

A incerteza é uma situação comum na agricultura, uma vez que a média dos valores observados geralmente não espelham a realidade, o que torna o planejamento agrícola um processo amplo, dependente da habilidade do administrador e das ferramentas e informações que esse dispõe para formatação e implementação do plano de produção.

A ineficiência do plano possui como causa principal o fator incerteza, o qual tem origem no processo de tomada de decisão, que por, sua vez, é condicionado pelo restrito volume de informações a que o indivíduo tem acesso durante o processo decisório (Arruda, 1982). Então, regulado pelo volume de informações disponíveis e, portanto, pelo grau de certeza sobre cada solução alternativa, o produtor pode fazer sua opção.

O sistema de produção agrícola vem sendo beneficiado pela utilização de ferramentas capazes de fornecer informações ao processo decisório, de modo a utilizar racionalmente recursos e insumos, tornando a atividade agrícola mais rentável. As informações necessárias devem ser fornecidas ao produtor rural para ele decidir a quantidade adequada de determinado insumo necessário à sua produção e o local e a época de aplicação do mesmo, de forma que resulte em maior lucro.

As técnicas agronômicas das últimas décadas têm sido desenvolvidas e aplicadas desconsiderando, muitas vezes, a variabilidade de rendimento das culturas e dos atributos de solo existentes nas áreas cultivadas. Porém, nos últimos anos, pesquisadores, técnicos e agricultores vêm demonstrando maior interesse na variabilidade existente nas lavouras cultivadas. A aplicação das informações geradas a partir dos dados da variabilidade presente nas lavouras tem sido facilitada devido ao avanço da informática, que possibilitou o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo e da construção de mapas de rendimento com técnicas de georeferenciamento. Estas técnicas de georeferenciamento da produtividade são denominadas agricultura de precisão (AP) (Molin, 1997; Sanaei & Yule, 1996 e Schueller, 1992).

Balastreire (2000) define agricultura de precisão como um conjunto de técnicas que permitem o gerenciamento localizado de culturas. Para Blackmore (1997a), a agricultura de precisão não é simplesmente a habilidade de aplicar tratamentos variáveis em níveis locais, mas também a capacidade de monitorar e avaliar precisamente o empreendimento no local e ao nível da fazenda, assim como entender os processos envolvidos, de maneira a alcançar determinadas metas.

Searcy (1997) considera que as técnicas de agricultura de precisão podem melhorar a sustentabilidade econômica e ambiental da produção. Na agricultura de hoje, os produtores tendem a cultivar cada campo como uma única unidade. Segundo Parkin & Blackmore (1995), a agricultura de precisão é uma aproximação de sistemas e requer uma compreensão dos processos envolvidos para alcançar uma meta particular. A meta pode não ser, necessariamente, a maximização do rendimento, mas a maximização da vantagem financeira dentro de uma série de constrangimentos ambientais e econômicos.

A partir da utilização das ferramentas de AP passou-se a adequar a administração da propriedade em relação à variabilidade presente nos campos de produção, nos quais a lavoura passa a ser vista como um somatório de pequenas subáreas tratadas individualmente e consideradas as menores unidades gerenciais, de maneira que a rentabilidade econômica de cada uma delas seja incrementada.

A irrigação constitui-se em uma tecnologia que complementa as demandas hídricas das culturas, evitando o comprometimento dos cultivos em eventual restrição hídrica. Ao mesmo tempo, essa tecnologia torna-se uma ótima alternativa, ao garantir rendimentos estáveis na lavoura ao longo dos anos, e ao proporcionar o aumento dos rendimentos nas diferentes situações de variabilidade existentes.

Em todos os modelos de eficiência econômica, segundo Kindler (1988), o objetivo é a minimização dos custos de produção e a maximização dos retornos econômicos líquidos, através do tempo, nos projetos de irrigação. Assim sendo, ao implementar-se um projeto de irrigação, é preciso que se objetive a maximização dos rendimentos das culturas, através de investimentos localizados e tecnicamente corretos, para obtenção de retornos econômicos frente aos altos investimentos no sistema de irrigação.

A ocorrência de variabilidade de rendimento dentro da área irrigada é indesejável, pois pode conduzir a resultados econômicos não satisfatórios. Essas áreas de cultivo, quando de alta intensidade de uso, podem favorecer a ocorrência de subáreas de baixo rendimento, acarretando assim, sucessivos prejuízos. Portanto, vislumbra-se um significativo potencial de uso da agricultura de precisão em áreas com pivô central.

A agricultura de precisão é uma ferramenta recente de gerenciamento da atividade agrícola. Estudos sobre a eficiência econômica da agricultura de precisão e do pivô central ainda são escassos no Sul do Brasil e são o objetivo central desta pesquisa.

## **6.2. Objetivos gerais**

Caracterizar a variabilidade do rendimento e da rentabilidade das culturas, em área irrigada via pivô central e de sequeiro, utilizando ferramentas da agricultura de precisão.

## **6.3. Objetivos específicos**

- Espacializar a variabilidade do rendimento dos cultivos e quantificar a variabilidade da rentabilidade em área irrigada e de sequeiro;
- Determinar o impacto econômico de zonas de baixo potencial de rendimento em área irrigada e de sequeiro.

## **6.4. Material e métodos**

O estudo foi realizado em uma área agrícola comercial, situada no município de Palmeira das Missões, RS.

### **6.4.1. Área experimental**

O presente estudo foi realizado em áreas comerciais de 58,2 ha irrigados via pivô central e 57,3 ha de sequeiro, localizadas no município de Palmeira das Missões - RS, km 15

da BR-468, situado entre as coordenadas UTM 262.517.3 (W) a 263.417.3 (W), e 6.919.887 (S) a 6.919.987 (S), fuso 22 Sul, em uma altitude média de 576 m, usando datum WGS84.

Conforme a Embrapa (1999), essa região situa-se na zona da escarpa arenito basáltica do Planalto Meridional Brasileiro, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 m e elevados teores de argila. O sistema de manejo empregado, há aproximadamente dez anos, é o de plantio direto, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno, e culturas da soja e do milho no verão.

O clima da região, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo Cfa – subtropical. A temperatura média normal do mês mais quente do ano, janeiro, é de 24,6°C, enquanto que a do mês mais frio, junho, fica em 12,9°C. Quanto à média normal das máximas, esta é de 30,4°C, em janeiro e de 19,2°C, em junho. A média das temperaturas mínimas do mês mais quente, dezembro, é de 18,7 °C, e a do mês mais frio, junho, é de 9,3 °C. As chuvas são distribuídas regularmente em praticamente todos os meses do ano, sem estação seca definida com precipitação oscilando entre 1.500 mm a 1.750 mm anuais.

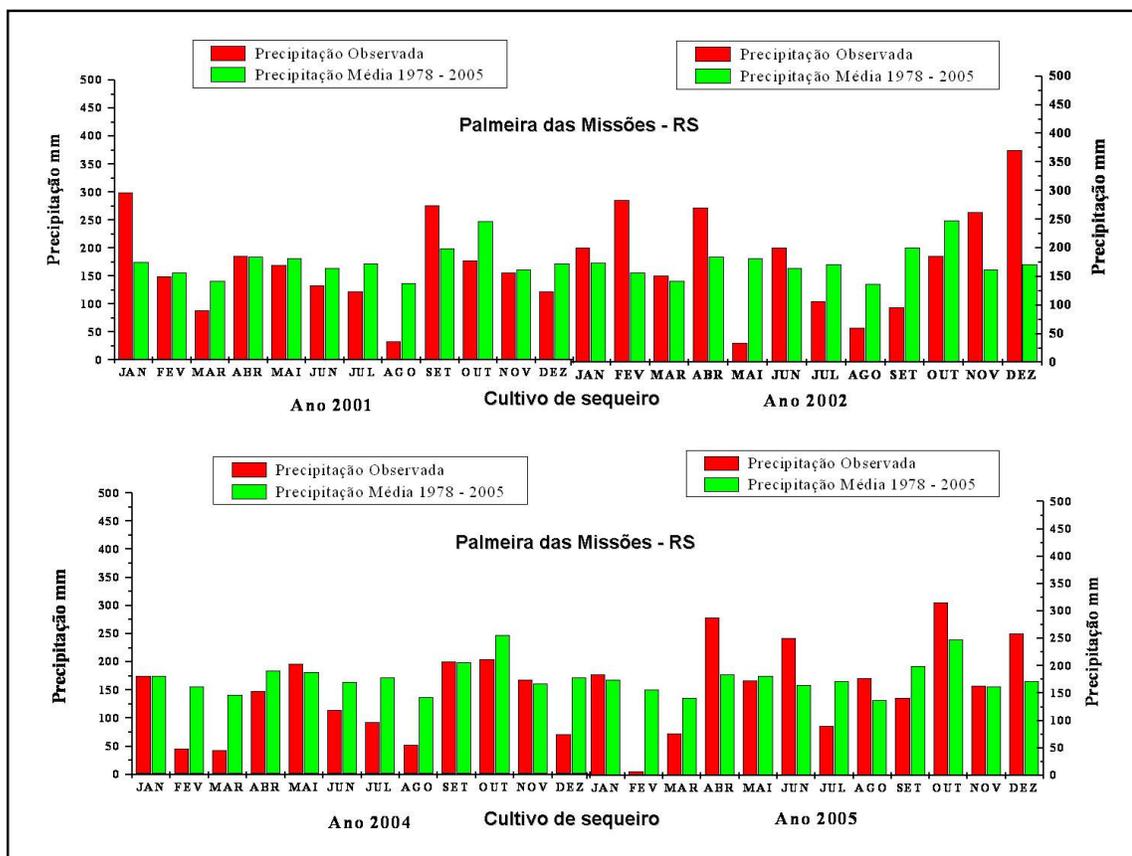


**Figura 1** – Mapa da localização das áreas estudadas (esquerda), e a vista aérea (direita) (A) Área irrigada via pivô central e (B) Cultivo de sequeiro, no município de Palmeira das Missões - RS.

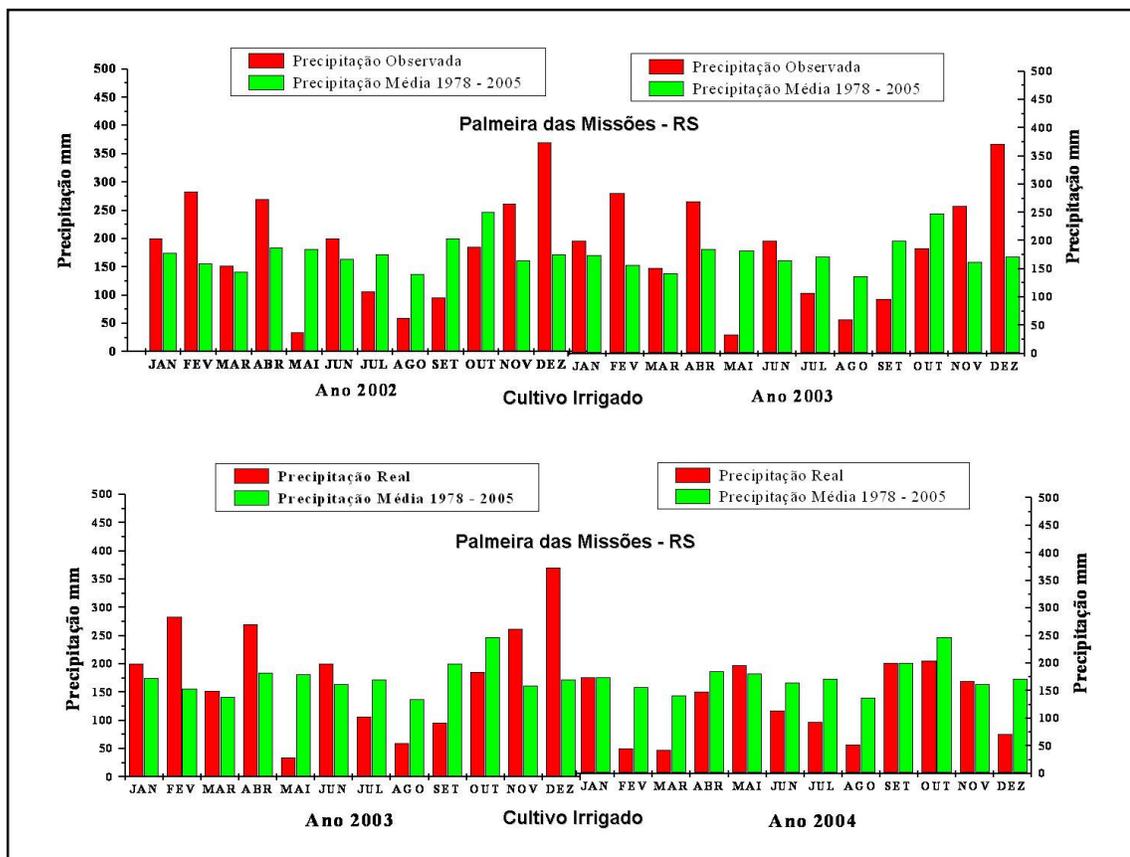
#### 6.4.2. Irrigações realizadas

As lâminas de água aplicadas sobre as áreas obedeceram aos critérios adotados pelos proprietários das áreas, que observam as recomendações dos fabricantes do sistema de irrigação. A cultura do milho nas safras 2002/03 e 2003/04 receberam 95,4 e 110,6 mm, os

quais foram distribuídos em lâminas de 9,5 e 12,3 mm, respectivamente. As precipitações ocorridas no período estudado são apresentadas nas Figuras 2 e 3.



**Figura 2** – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.



**Figura 3** – Pluviogramas dos anos de cultivo da área experimental de Palmeira das Missões, RS.

### 6.4.3. Dados de produtividade

#### 6.4.3.1. Coleta dos dados

Dados de produtividade georeferenciados da cultura de milho foram obtidos nas safras 2003/04 e 2004/ 05, através do auxílio de uma colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o sistema Fieldstar<sup>®</sup> de agricultura de precisão (Figura 2). Essa congrega um conjunto de sensores de rendimento do tipo Micro Track<sup>®</sup> de duas hastes, cartão para armazenamento de dados tipo PCMCIA e uma antena receptora de sinal com Sistema de Posicionamento Global (GPS) da marca Garmin<sup>®</sup>. A tecnologia embarcada nessa colhedora permite que o usuário registre e armazene, em um determinado intervalo de tempo, a posição (latitude, longitude e altitude) da máquina e a quantidade de produção por unidade de área.

A colhedora utilizada nesta pesquisa não estava equipada com sensor de umidade de grãos, então a correção desse fator baseou-se em tratar cada carga como um arquivo individual no sistema de armazenamento dos dados. Após a colheita do volume de grãos correspondente a cada carga, o volume era pesado e descarregado, com posterior retirada de amostra de grãos para determinação de umidade e impurezas. Essas últimas foram corrigidas, obtendo-se, assim, dados de produtividade com elevado grau de confiabilidade, baseando-se na conferência do peso do produto registrado pela balança e o estimado pelo sistema da colhedora. Neste caso, o erro estimado é inferior a 2%, segundo o proprietário (Sulzbach, 2006<sup>4</sup>). O sensor de rendimento de grãos era submetido à limpeza duas vezes ao dia (manhã e tarde). A velocidade de deslocamento da máquina foi mantida constante e após cada descarga do tanque graneleiro o ponto zero era conferido.



**Figura 4** – Colhedora Massey Ferguson, modelo MF 34 equipada com o Sistema Fieldstar<sup>®</sup>.

#### **6.1.3.2. Tratamento dos dados**

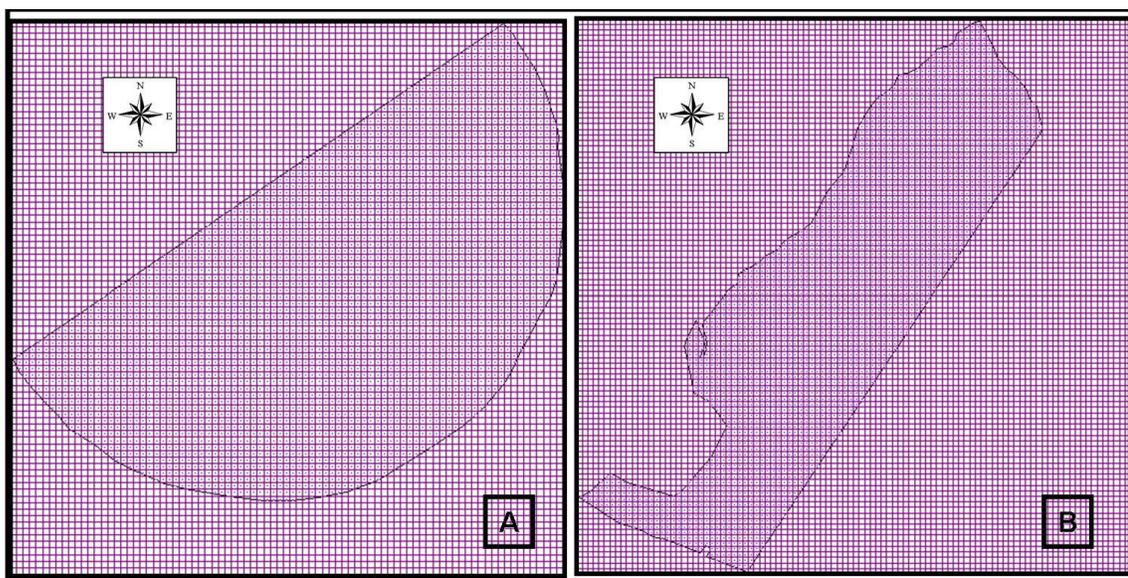
Os dados georeferenciados de rendimento foram coletados com alta frequência de gravação (2 e 3 segundos), o qual gerou uma malha de alta densidade de pontos. Esses foram submetidos a um processo de filtragem, a fim de identificar e eliminar eventuais erros (“outliers”), como proposto por Menegatti, 2002. Após, os dados de colheita sofreram um processo de redução da densidade de pontos. As áreas mapeadas foram divididas em quadrículas (células) com dimensões de 13 x 13 metros perfazendo uma área de 169 m<sup>2</sup> para

---

<sup>4</sup> Comunicação pessoal

área irrigada e 14.5 x 14.5 metros com área de 210,3 m<sup>2</sup>, no cultivo de sequeiro (Figura 5), contendo latitude, longitude e a massa de grãos.

Os dados das produtividades de cada colheita foram submetidos à análise de estatística exploratória através do Golden Software Grapher Version 3 (2000), com o objetivo de verificar a amplitude e a variabilidade horizontal da produtividade existentes nas áreas. Para a construção dos mapas de rendimento, utilizou-se o programa Software Campeiro 5 – AV3 (Giotto, 2004). O resultado foi um mapa digital, representando a variabilidade da produtividade nas culturas estudadas.



**Figura 5** – Quadrículas com demissões de 13 x 13 metros na área experimental (A) irrigada, e 14.5 x 14.5 metros na área de sequeiro (B), em Palmeira das Missões, RS.

#### 6.4.4. Dados econômicos

Para o desenvolvimento da análise econômica simplificada, comparando a área de sequeiro com a irrigada, os dados econômicos como preço do milho comercializado (média anual), dólar (média anual) e os custo de produtividade, foram obtidos de planilhas de cooperativas, da FecoAgro/RS Assessoria Econômica/RS, empresas fornecedoras e dados obtidos diretamente nas propriedades.

**Tabela 1** - Parâmetros econômicos baseados na análise econômica, das safras analisadas, para as áreas de estudo em Trindade do Sul, RS e de Palmeira das Missões, RS.

Variável Estatística	Manejo/ Cultura/ Safra			
	Sequeiro		Irrigado	
	Milho <sup>1</sup> Safrá 2001/02	Milho <sup>1</sup> Safrá 2004/05	Milho <sup>2</sup> Safrá 2002/03	Milho <sup>2</sup> Safrá 2003/04
Dólar (US\$) <sup>3</sup>	2,47	2,85	2,86	2,99
Preço de venda (US\$) <sup>4</sup>	6,26	6,28	5,65	5,85
CP (US\$ ha <sup>-1</sup> ) <sup>5</sup>	268,77	478,29	290,29	365,21
CI (US\$ ha <sup>-1</sup> ) <sup>6</sup>	0	0	50,89	49,93
CPV (US\$ ha <sup>-1</sup> ) <sup>7</sup>	0	0	37,50	37,50
CTP (US\$ ha <sup>-1</sup> ) <sup>8</sup>	268,77	478,29	378,68	452,64

<sup>1</sup> Produção de grãos em 57 ha área de estudo coxilha colorado, Palmeira das Missões – RS;

<sup>2</sup> Produção de grãos em 58 ha área de estudo pivô, Palmeira das Missões – RS;

<sup>3</sup> Cotação do dólar, segundo FecoAgro/RS Acessoria Econômica;

<sup>4</sup> Preço de venda de milho saca de 60 kg, segundo Cooperativas e FecoAgro/RS Acessoria Econômica;

<sup>5</sup> Custos de produção, segundo Cooperativas e FecoAgro/RS Acessoria Econômica;

<sup>6</sup> Custos médios da irrigação, segundo dados gerados nas propriedades;

<sup>7</sup> Custos médios do pivô central para dois cultivos anuais, US\$ 1.500 ha<sup>-1</sup> com vida útil de 20 anos, segundo empresas fornecedoras;

<sup>8</sup> Custos total de produção, segundo dados gerados nas propriedades e FecoAgro/RS Acessoria Econômica.

## 6.5. Resultados e discussão

Os dados de produtividade na área de sequeiro foram registrados com alta frequência de coleta, totalizando 43.085 (1 segundo) e 29.332 (2 segundos) pontos georeferenciados de rendimento, para a safra 2001/2002 e safra 2004/05 de milho, respectivamente. Já na área irrigada, os dados de rendimento totalizaram 25.677 e 26.937 (2 segundos) nas safras de 2002/03 e 2003/04, respectivamente. Os dados sofreram posteriormente um processo de redução da densidade dos pontos de rendimento, denominadas quadrículas (células), totalizando 2.695 pontos para as safras 2001/02 e 2004/05, na área de sequeiro, enquanto que na área irrigada, os pontos remanescentes totalizaram 3.466 para as safras de 2002/03 e de 2003/04.

Os dados de rendimento foram, em um primeiro momento, avaliados por parâmetros de estatística exploratória, os quais são apresentados na Tabela 2.

Os rendimentos médios na área de sequeiro foram de 7.830 e 5.992 kg ha<sup>-1</sup>, com coeficientes de variação de 17,38 e 27,00 %, respectivamente. Por outro lado, na área irrigada, os rendimentos médios da cultura do milho atingiram 9.074 e 8.158 kg ha<sup>-1</sup>, apresentando coeficientes de variação de 14,99 e 13,04 % para as safras de 2002/03 e de 2003/04, respectivamente (Tabela 2).

Os rendimentos do milho na área de sequeiro variaram de 3.334 a 12.137 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2001/02 e de 2.446 a 14.427 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2004/05. No entanto, na área irrigada, o rendimento variou de 4.541 a 12.510 kg ha<sup>-1</sup>, e, 3.742 a 11.155 kg ha<sup>-1</sup>, nas safras 2002/03 e 2003/04, respectivamente. Os dados da variação do rendimento revelam que a amplitude da área de sequeiro é de 4 a 6 vezes, e na área irrigada é de 3 a 4 vezes. Além disso, os rendimentos máximos foram semelhantes em ambas as áreas (irrigada e não irrigada), e a principal diferença ficou no rendimento mínimo, o qual foi superior na área irrigada.

Na média dos dois anos, a área não irrigada produziu 6.911 kg ha<sup>-1</sup> e a área irrigada 8.616 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja, 1.705 kg ha<sup>-1</sup> a mais que a área não irrigada. Esses dados confirmam a existência de fatores limitantes do rendimento nas áreas irrigadas em estudo, pois mesmo quando supridas as necessidades hídricas, o rendimento médio ficou muito abaixo do potencial genético dos híbridos utilizados.

**Tabela 2** - Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade em duas safras ocorridas na área de estudo de Palmeira das Missões, RS.

Variável Estatística	Manejo/ Cultura/ Safra			
	Sequeiro		Irigado	
	Milho <sup>2</sup> Safra 2001/02	Milho <sup>2</sup> Safra 2004/05	Milho <sup>3</sup> Safra 2002/03	Milho <sup>3</sup> Safra 2003/04
Mínimo (kg)	3.334	2.456	4.541	3.810
Máximo (kg)	12.137	14.427	12.510	11.155
Média (kg)	7.830	5.992	9.074	8.158
Mediana (kg)	7.928	5.835	9.311	8.225
Quartil Inferior (kg)	6.863	5.067	8.332	7.588
Quartil Superior (kg)	8.867	6.652	9.966	8.889
Desvio Padrão	1.360,5	1.502,2	1360,34	1063,81
CV (%)	17,38	27,07	14,99	13,04
Wilks-Shapiro <sup>1</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,96 <sup>ns</sup>	0,96 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup> Teste de Wilks-Shapiro para normalidade; ns indica que a hipótese de distribuição normal dos dados é aceita;

<sup>2</sup> Produção de grãos em 57 ha, área de estudo Palmeira das Missões – RS;

<sup>3</sup> Produção de grãos em 58 ha, área de estudo Palmeira das Missões – RS.

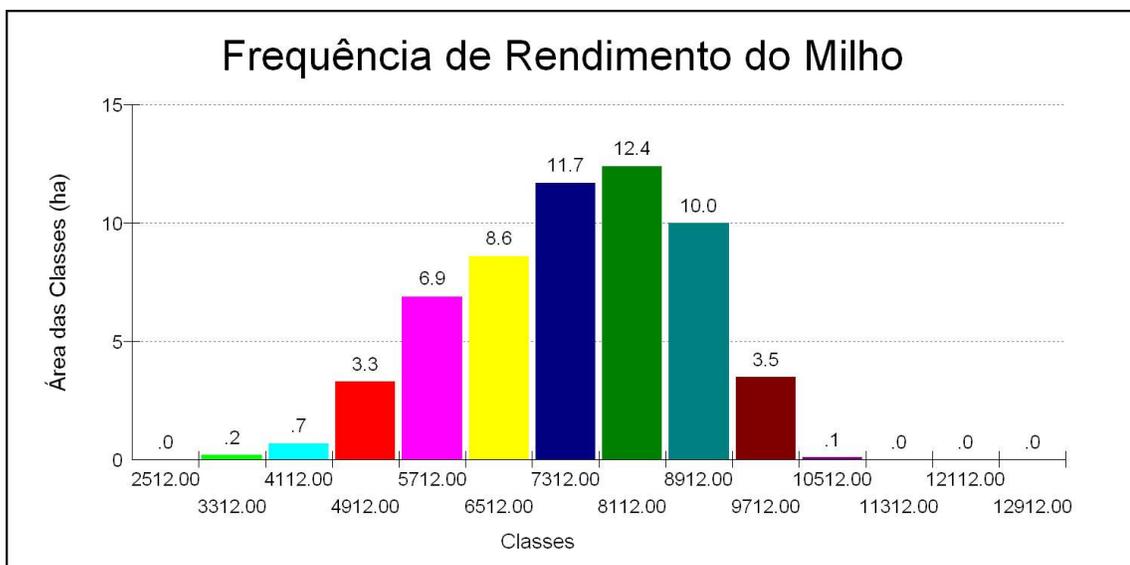
Na área cultivada em sequeiro, a maior produtividade média foi expressa na safra 2004/05, apesar de ter sido prejudicada pela estiagem ocorrida nesse ano (Figura 3). Isso pode ser explicado pela localização de um reduzido número de pontos de alto rendimento nas partes baixas do terreno, sendo favorecidos com uma maior oferta de água (Figura 11B). Tal resultado é apoiado pelo quartil superior e inferior e pela média e mediana, os quais são inferiores à safra 2001/02, comprovando que a maior parte da área sofreu restrição hídrica.

A produtividade média das culturas, considerada até então como uma informação importante nos cultivos, passa a ser questionada, à medida que identificamos variabilidade nas produtividades, através das ferramentas de agricultura de precisão. Assim, a geração de mapas de rendimento, além de ser uma fonte de informações para a tomada de decisões, permite espacializar a produtividade das culturas, reflexo das condições predominantes em seu ciclo produtivo.

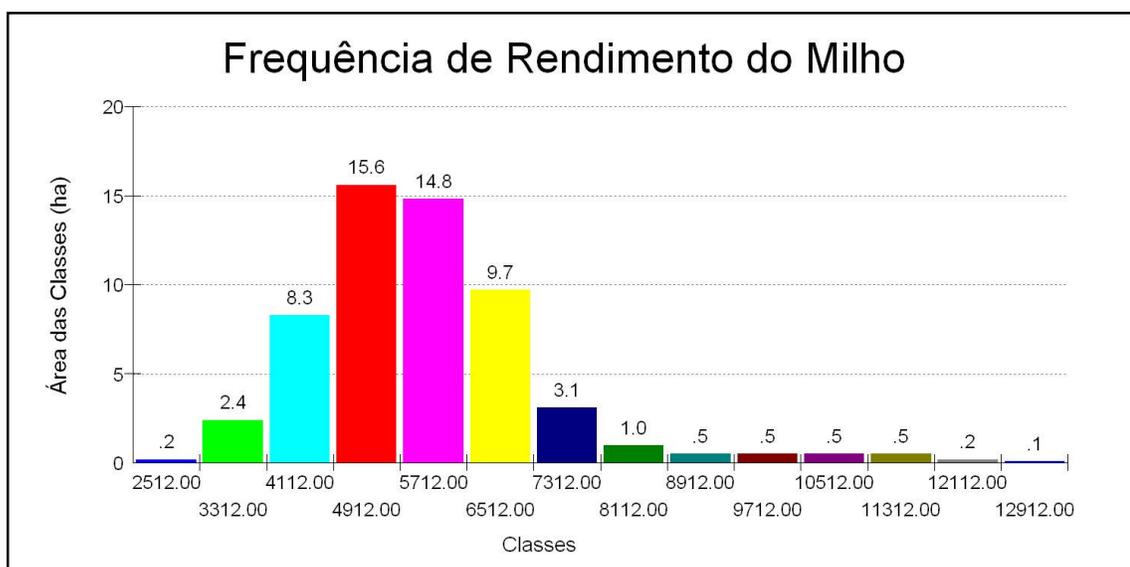
De acordo com os dados apresentados, a área de sequeiro apresenta menores rendimentos mínimos e médios e a variabilidade é aumentada pela inexistência de irrigação, a qual se acentua ainda mais em anos com déficit hídrico. Essa afirmação pode ser observada a partir dos valores das Médias, Quartis e CV's dos rendimentos, encontrados nos cultivos de sequeiro, em comparação aos irrigados.

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 observa-se que os histogramas de rendimento da área de sequeiro apresentam produtividades com maior amplitude de variação, comparados às safras das áreas irrigadas. Na área irrigada, a amplitude é reduzida em função de o rendimento estar concentrado em torno da média, e com baixa frequência de áreas onde ocorrem baixos rendimentos.

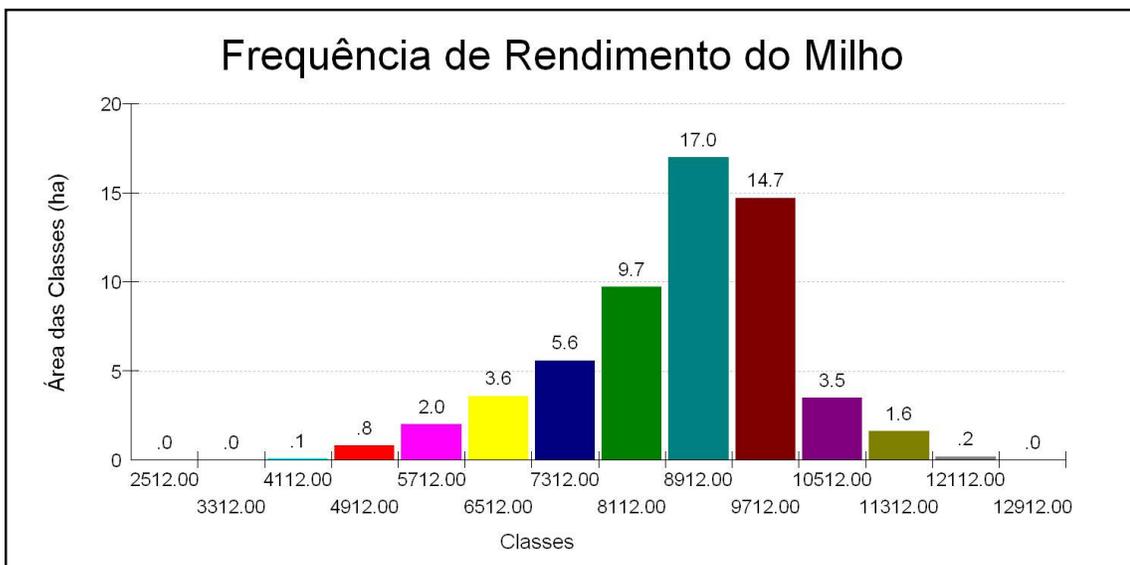
Os rendimentos máximos da área irrigada e de sequeiro praticamente não foram alterados, porém, o efeito mais pronunciado foi elevar o rendimento mínimo da área irrigada, em comparação ao rendimento de sequeiro. Assim, ocorreu um aumento da média na área irrigada, ditada por incrementos nos rendimentos de subáreas que continham produtividades baixas, na condição de sequeiro. Vale lembrar que se trata de safras diferentes, o que pode induzir certas limitações, porque as condições climáticas como insolação, vento e frequências de precipitações não podem ser controladas e certamente influenciaram nos resultados obtidos. Assim, sugere-se que, em futuros trabalhos, seja levada em conta uma base maior de anos para comparação de mapas de rendimento.



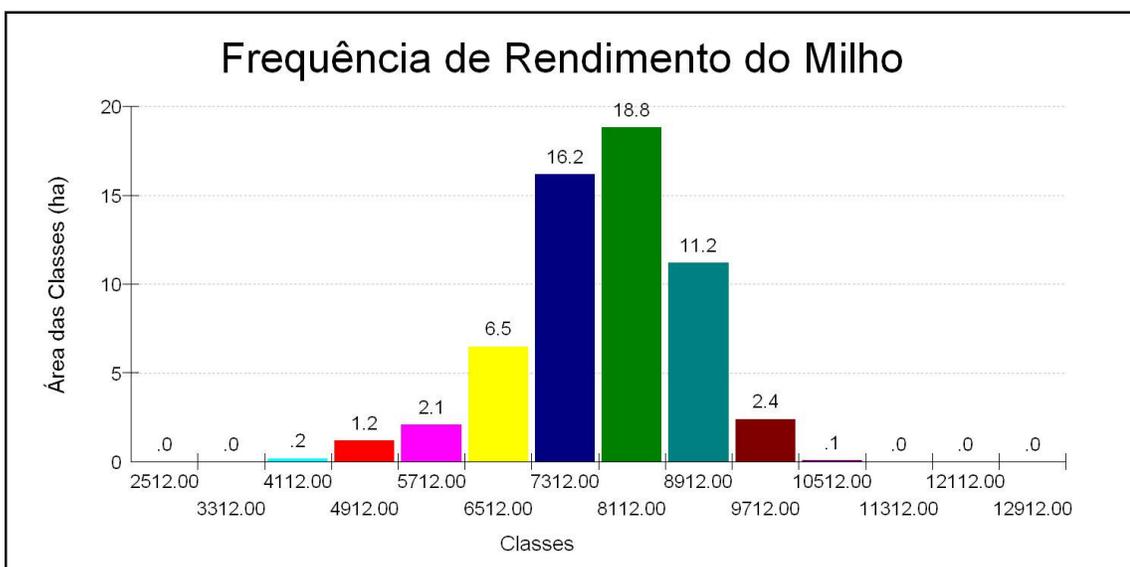
**Figura 6** – Histograma de distribuição da frequência da safra 2001/02 da cultura do milho, da área de sequeiro estudada em Palmeira das Missões, RS.



**Figura 7** – Histograma de distribuição da frequência da safra 2004/05 da cultura do milho da área de sequeiro estudada em Palmeira das Missões, RS.



**Figura 8** – Histograma de distribuição da frequência da safra 2002/03 da cultura do milho da área irrigada estudada em Palmeira das Missões, RS.



**Figura 9** – Histograma de distribuição da frequência da safra 2003/04 da cultura do milho da área irrigada estudada em Palmeira das Missões, RS.

O comportamento do rendimento nas áreas estudadas reflete a variação ocorrida nas culturas comerciais, nas quais em todas as subáreas esperava-se que as produtividades fossem, no mínimo, equivalentes aos investimentos realizados. Os custos de produção são de suma importância na atividade agrícola, na qual se busca cada vez mais uma melhor gestão de recursos. Ao mesmo tempo, além do conhecimento dos custos gerais, necessita-se conhecer

cada vez mais os custos de cada subárea da lavoura, a fim de se identificar o real retorno líquido, norteados as intervenções de manejo.

A espacialização dos custos e receitas é uma maneira de gerenciamento da lavoura que permite ao técnico e/ou produtor obter um panorama de sua lavoura e um alerta de possíveis casos de ocorrência de rentabilidades baixas. Esse gerenciamento aplica-se a todas as culturas e lavouras agrícolas, mas em especial, às áreas irrigadas, onde os custos envolvidos são de maior magnitude.

Os rendimentos, tanto na área de sequeiro quanto na área irrigada, apresentaram rendimentos variáveis em áreas de tamanho distintos, e, conseqüentemente, obteve-se rentabilidades variáveis em ambas as áreas estudadas (Tabelas 3 e 4 e na Figura 10).

**Tabela 3** – Classes de produtividade de milho sequeiro, área correspondente, número de pontos e rentabilidade média para área experimental de Palmeira das Missões, RS.

Produtividade (Ton ha <sup>-1</sup> )**		Área (ha)		Número de pontos (n°)		Rentabilidade média <sup>1</sup> (US\$ ha <sup>-1</sup> ***)	
L. mín.	L. máx.	01/02*	04/05*	01/02*	04/05*	01/02*	04/05*
3,33	3,65	0,06	0,84	4	61	93,68	- 132,37
3,65	4,85	0,72	8,98	35	445	196,24	- 23,09
4,85	6,05	5,73	22,69	266	995	313,51	105,12
6,05	7,25	12,30	18,04	589	857	427,86	209,79
7,25	8,45	17,33	4,12	789	210	551,29	329,79
8,45	9,65	16,93	0,90	794	47	668,77	466,85
9,65	10,85	4,21	0,71	214	23	770,70	594,96
10,85	12,05	0,04	0,77	3	33	878,06	713,86
12,05	13,25	0,02	0,26	1	19	997,52	827,85
13,25	14,45	0	0,11	0	5	0	969,46
Total		57	57	2.695	2.695	31.018,47	17.624,25

\* Intervalo entre classes: 1,20 toneladas;

\*\* Produtividades obtidas nas safras: (01/02) - 2001/02 e (04/05) 2004/05, respectivamente;

\*\*\* Cotação do dólar: 2001/02 R\$ 2,47 e 2004/05 R\$ 2,85;

<sup>1</sup> Rentabilidade: custos e preço recebido pelo produtor, segundo Cooperativas e FecoAgro/RS Assessoria Econômica.

Os custos na área de sequeiro atingiram US\$ 268,77 ha<sup>-1</sup> e US\$ 478,29 ha<sup>-1</sup>, com preço médio de comercialização de US\$ 6,26 e 6,28 a saca de 60 kg, nas safras de milho de 2001/02 na e 2004/ 05. Em contrapartida, na área irrigada o custo alcançou patamares de US\$ 378,68 e US\$ 452,64 ha<sup>-1</sup> com preço médio de comercialização de US\$ 5,65 e US\$ 5,85 a saca de 60 kg nas safras 2002/03 e 2003/04. A irrigação corresponde um custo médio de US\$ 87,91 ha<sup>-1</sup>,

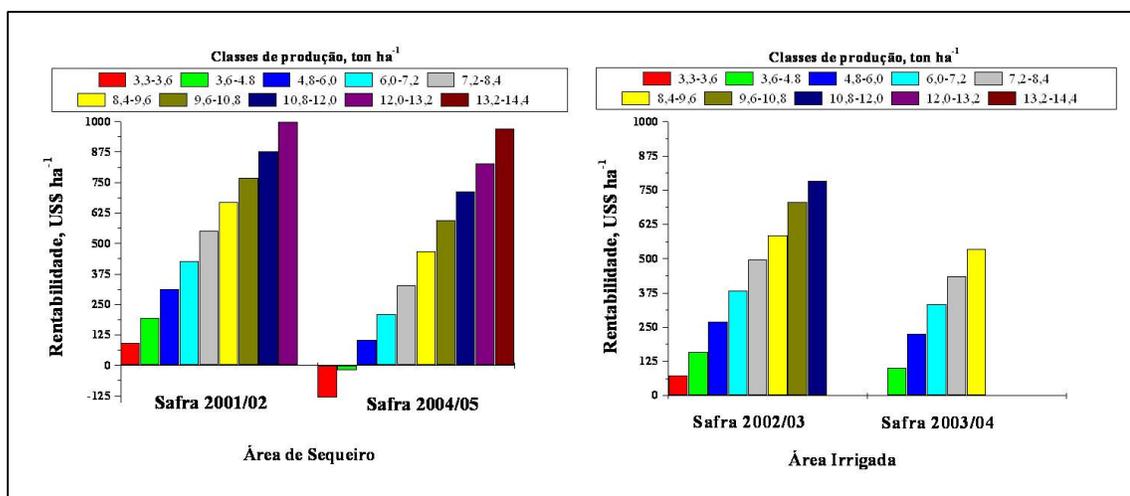
os quais representam 23,34 % e 19,32 % dos custos totais das safras 2002/03 e 2004/05, respectivamente.

No cultivo de sequeiro, a rentabilidade por hectare variou de US\$ 93,68 a US\$ 997,52 na safra de 2001/02, enquanto que na safra 2004/05 a variação obtida foi de US\$ -132,37 a US\$ 969,46. Na safra 2001/02, a maior subárea homogênea, 16,93 ha, apresentou rentabilidade média de US\$ 668,77 totalizando 29,46 % dos pontos de colheita. Já na safra 2004/05 em 36,92 % dos pontos a renda foi de US\$ 105,12 em área correspondente a 22,69 ha (Tabela 3). Os resultados demonstram uma forte queda de renda no segundo cultivo, devido, principalmente, ao aumento dos custos de produção em 43,80 %, em relação ao primeiro.

Na área irrigada, o rendimento mínimo ocorreu em 0,34 e 0,92 % dos pontos de colheita, enquanto que o maior rendimento ocorreu em 0,46 e 3,98 % dos pontos, nas safras de 2002/03 e 2003/04, respectivamente. As maiores áreas das classes, foram de 21,49 e 27,29 há representados por 1.309 e 1.548 pontos de colheita nas safras de 2002/03 e 2003/04, sendo que a rentabilidade por hectare foi de US\$ 495,79 e US\$ 332,24 respectivamente (Tabela 4).

A disparidade na rentabilidade na área irrigada nas safras apresentadas mostra que a área apresenta variabilidade temporal (Figura 10). Na safra 2002/03, a rentabilidade mais expressiva ocorreu em 0,13 ha apresentando um resultado de US\$ 784,45 ha<sup>-1</sup>, ao mesmo tempo, na safra de 2003/04 alcançou um máximo de US\$ 534,06 ha<sup>-1</sup> de rentabilidade em área correspondente a 1,87 ha. Entretanto, fatores como híbridos e seu potencial produtivo, adubações nitrogenadas, também podem ter contribuído para expressar a variabilidade do rendimento de forma diferenciada através dos anos. Ao mesmo tempo, na área de sequeiro as diferenças de rendimento e de rentabilidade entre as safras estudadas podem ser explicadas pela união de dois fatores; baixa produtividade alcançada na safra 2004/05 em decorrência da estiagem e pelo aumentando dos custos de produção.

Os custos da implantação e manutenção das lavouras totalizaram US\$ 268,77 ha<sup>-1</sup> na safra 2001/02 e US\$ 478,29 ha<sup>-1</sup> na safra de 2004/05 na área de sequeiro, enquanto que na área irrigada foram de US\$ 378,68 e US\$ 452,64 ha<sup>-1</sup> nas safras 2002/03 e 2003/04, respectivamente (Tabela 4). Esses custos foram gerados de forma homogênea em todo o talhão, entretanto, não foram eficientes de maneira que as culturas apresentassem rendimentos homogêneos na totalidade da área.



**Figura 10** – Histograma de distribuição de frequência das rentabilidades das safras de sequeiro e irrigada da cultura do milho, em Palmeira das Missões, RS.

**Tabela 4** - Parâmetros estatísticos dos dados de produtividade, custos de produção e rendimento de equilíbrio, em duas safras na área de estudo Palmeira das Missões - RS.

Variável Estatística	Manejo/ Cultura/ Safra			
	Sequeiro		Irigado	
	Milho <sup>1</sup> Safra 2001/02	Milho <sup>1</sup> Safra 2004/05	Milho <sup>2</sup> Safra 2002/03	Milho <sup>2</sup> Safra 2003/04
Mínimo (kg)	3.334	2.456	4.541	3.810
Máximo (kg)	12.137	14.427	12.510	11.155
Média (kg)	7.830	5.992	9.074	8.158
CP <sup>3</sup> (US\$ ha <sup>-1</sup> )	268,77	478,29	378,68	452,64
RE <sup>4</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	2.576	4.570	4.014	4.642
% Área < R. Médio <sup>5</sup>	48,36	55,28	42,95	47,60
% Área < RE <sup>6</sup>	0	6,36	0	0

<sup>1</sup> Produção de grãos em 57 ha, área de estudo Palmeira das Missões – RS;

<sup>2</sup> Produção de grãos em 58 ha, área de estudo Palmeira das Missões – RS;

<sup>3</sup> Custo de produção, segundo Cooperativas e FecoAgro/RS Assessoria Econômica;

<sup>4</sup> Rendimento de equilíbrio, cotação do dólar: 2001/02 R\$ 2,47 e 2004/05 R\$ 2,85 área de sequeiro e 2002/03 R\$ 2,86 e 2003/04 R\$ 2,99 área irrigada;

<sup>5</sup> Percentagem de área < rendimento médio de milho;

<sup>6</sup> Percentagem de área < rendimento de equilíbrio.

A partir dos custos de implantação e manutenção é possível calcular a produtividade de equilíbrio, o qual deve ser a mínima produção para que sejam cobertos os custos totais dos cultivos. No cultivo de sequeiro, a cultura do milho necessitou de uma produtividade mínima de 2.576 kg ha<sup>-1</sup> para safra 2001/02 e, 4.570 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2004/05 para equivaler ao custo

médio de produção  $\text{ha}^{-1}$ . Já, na área irrigada foi necessária a produção de  $3.618 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $4.258 \text{ kg ha}^{-1}$  para safras 2002/03 e 2003/04, respectivamente (Tabela 4).

Para os anos e safras estudadas, a cada dólar investido na área de sequeiro em média obtem-se um retorno de  $18,50 \text{ kg}$  de milho, em quanto que, na área irrigada é produzido  $20,73 \text{ kg}$  por dólar investido (Tabela 5). Dessa maneira, a irrigação permite um aumento no rendimento na ordem de  $2,23 \text{ kg}$  por dólar aplicado, para os anos estudados.

A média dos custos totais e a produtividade total da área de sequeiro foram de US\$  $21.291,21$  e  $393.927,00 \text{ kg}$  em  $57 \text{ ha}$ , enquanto que na área irrigada foi de  $24.108,28$  e  $499.728,00 \text{ kg}$  para os  $58 \text{ há}$  cultivados. Esses dados revelam que a área irrigada apresentou um custo de  $42,13 \text{ ha}^{-1}$  superior a de sequeiro, em contra partida, na lavoura irrigada o rendimento foi  $170,80 \text{ ha}^{-1}$  maior. Ao subtrair o rendimento superior obtido, do custo, tem-se um ganho de  $128,67 \text{ ha}^{-1}$  superior, ou seja,  $21,40$  sacas. Nesse sentido, levaríamos de 7 a 10 anos para retornar os investimentos realizados na instalação do sistema de irrigação.

**Tabela 5** - Parâmetros econômicos médios, das safras analisadas, para as áreas de estudo em Trindade do Sul, RS e Palmeira das Missões, RS.

	Manejo/ Cultura	
	Milho/Sequeiro <sup>1</sup>	Milho/Irigado <sup>2</sup>
CTP (US\$ $\text{ha}^{-1}$ ) <sup>3</sup>	373,53	415,66
Produtividade Média (kg) <sup>4</sup>	6.911	8.616
Preço médio de venda (US\$) <sup>5</sup>	6,01	6,01
US\$/kg produzido <sup>6</sup>	18,50	20,73

<sup>1</sup> Média da produção de grãos em  $57 \text{ ha}$  área de estudo coxilha colorado, Palmeira das Missões – RS;

<sup>2</sup> Média da produção de grãos em  $58 \text{ ha}$  área de estudo pivô, Palmeira das Missões – RS;

<sup>3</sup> Média do custo total de produção, segundo dados gerados nas propriedades e FecoAgro/RS Acessoria Econômica;

<sup>4</sup> Produtividade média das safras de sequeiro e irrigada;

<sup>5</sup> Preço de venda do milho (médias dos 4 anos), saca de  $60 \text{ kg}$  segundo Cooperativas e FecoAgro/RS Acessoria Econômica;

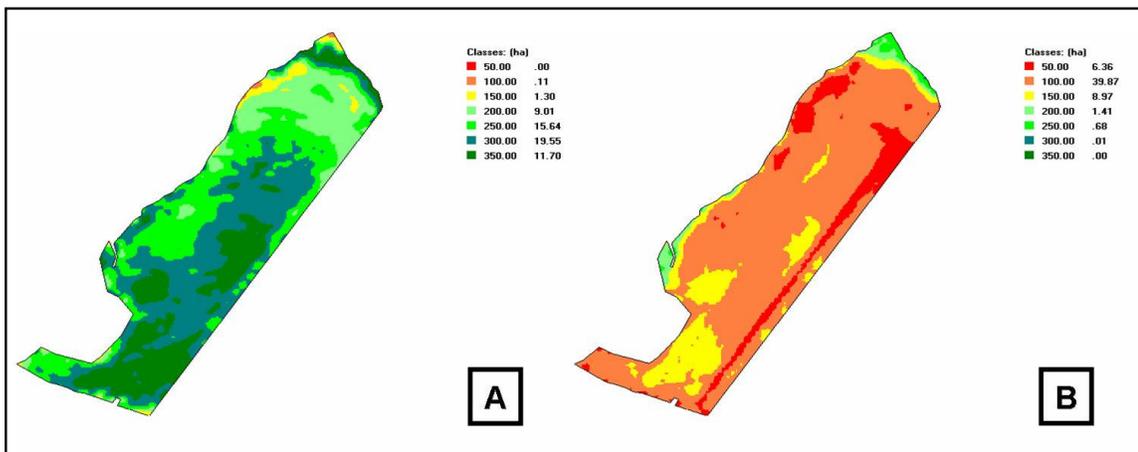
<sup>6</sup> Média de dólar investido por  $\text{kg}$  de milho produzido nas safras.

Vale lembrar de que os anos e safras estudadas apresentam características distintas, no que diz respeito à magnitude dos custos gerados, da produtividade alcançada, da variação climática ocorrida (estiagem no ano de 2004/05), e entre outros fatores, os quais contribuíram para a existência de variabilidade de custos e receitas.

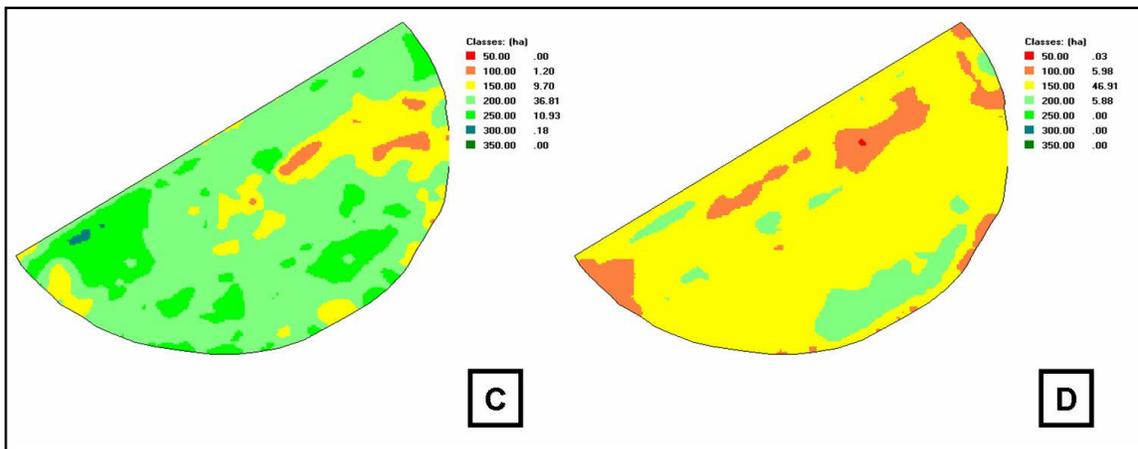
A espacialização do rendimento de equilíbrio (RE) através dos anos, nos permite visualizar subáreas onde a rentabilidade líquida está sendo retraída por algum fator, e ao

mesmo tempo, sinalizam quais as áreas que necessitam de uma análise mais detalhada, a fim de avaliar e encontrar as causas dessa retração. Assim, as Figura 11 e 12 retratam as situações encontradas nas áreas de sequeiro e irrigada para as safras estudadas, nas quais o rendimento de equilíbrio equivale a 100 %.

Quando se considera a variabilidade existente a partir do rendimento de equilíbrio, percebe-se que, na safra 2004/05, da área de sequeiro, 6,36 ha produziram abaixo do RE, enquanto que, na área irrigada, nenhuma das safras estudadas apresentou rendimento abaixo desse. O fato de a safra 2004/05 ter produzido em algumas subáreas abaixo do custo pode ser atribuído ao aumento dos custos de produção e à diminuição do rendimento (estiagem), relatados anteriormente.



**Figuras 11** – Percentagem em relação ao rendimento de equilíbrio (RE) das safras (A) 2001/02 e (B) 2004/05 da área de sequeiro, Palmeira das Missões, RS.



**Figuras 12** – Percentagem em relação ao rendimento de equilíbrio (RE) das safras (A) 2001/02 e (B) 2004/05 da área irrigada, Palmeira das Missões, RS.

À medida que estabelecemos essas isolinhas de RE, percebemos que existem intervalos de rendimento onde provavelmente alguns atributos e/ou propriedades do solo estão favorecendo e/ou limitando o incremento das produtividades, sendo muitas vezes agravadas ainda mais pela ausência de irrigação (Figuras 11 e 12).

As classes percentuais do RE, transformadas em mapa de isolinhas e cruzadas com as informações de solo, podem auxiliar no direcionamento das interferências em áreas consideradas menos e mais responsivas. Áreas de menor rentabilidade (menor potencial produtivo) podem ser necessárias melhorias e/ou modificações de manejo do solo ou de atributos, os quais podem estar limitando o rendimento das culturas. Por outro lado, têm-se áreas com maior rentabilidade (maior potencial produtivo), as quais devem ser enfocadas da mesma forma, a fim de manter e/ou melhorar o rendimento destas subáreas.

O conjunto de melhorias pode determinar ganhos graduais em qualidade do solo, potencializando essas áreas à obtenção de melhores índices de rendimentos e conseqüentemente de rentabilidade ao longo dos anos, especialmente nas áreas irrigadas.

Ao simular modelos teóricos, onde algumas interferências no manejo do solo e da cultura venham a trazer melhorias podemos construir cenários de ganhos em rentabilidade, as quais são apresentadas nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Caso alguma(s) intervenção(s) no campo produtivo consigam elevar a produtividade em 5 % no intervalo de produtividade 3,33 a 3,65 e 7,25 a 8,45 ton/ ha, teremos incrementos de US\$ 23,25 ha<sup>-1</sup> e US\$ 41,00 ha<sup>-1</sup> em 0,06 ha e 17,33 ha na área de sequeiro, respectivamente (Tabelas 6 e 7). Já na área irrigada, ao incrementar 5 % e 10 % dos rendimentos nos intervalos, seria obtido na rentabilidade na ordem de US\$ 2.384,78 e US\$ 4.769,56 para a safra de 2002/03 e, para a safra 2003/04, US\$ 2.129,81 e US\$ 4.259,62 na área estudada (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 6** – Produtividade do milho, área correspondente, rentabilidade média real, para área experimental de sequeiro, Palmeira das Missões, RS.

Produtividade *		Área (ha)	R. Média <sup>1</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>
Média (ton ha <sup>-1</sup> )	L. mín. L. máx. **		(US\$ ha <sup>-1</sup> ) Real	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 5 % >	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 10 % >	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 20 % >
3,33	3,65	0,06	93,68	129,93	92,43	166,17
3,65	4,85	0,72	196,24	219,49	205,25	289,25
4,85	6,05	5,73	313,51	342,63	334,24	429,97
6,05	7,25	12,30	427,86	462,70	460,03	567,19
7,25	8,45	17,33	551,29	592,29	595,80	715,30
8,45	9,65	16,93	668,77	715,65	725,02	856,28
9,65	10,85	4,21	770,70	822,68	837,15	978,60
10,85	12,05	0,04	878,06	935,40	955,25	1.107,43
12,05	13,25	0,02	997,52	1.060,84	1.086,65	1.250,78
Total		57	31.018,47	33.335,39	35.652,31	40.286,15

\*\* Produtividade alcançada na safra de 2001/02; cultivo de sequeiro.

\* Intervalo entre classes: 1,20 toneladas.

<sup>1</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com rendimento real;

<sup>2</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com incremento de 5 %, 10 % e 20 % no rendimento;

**Tabela 7** – Produtividade do milho, área correspondente, rentabilidade média real, para área experimental de sequeiro, Palmeira das Missões, RS.

Produtividade *		Área (ha)	R. Média <sup>1</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>
Média (ton ha <sup>-1</sup> )	L. mín. L. máx. **		(US\$ ha <sup>-1</sup> ) Real	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 5 % >	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 10 % >	(US\$ ha <sup>-1</sup> ) R 20 % >
2,45	3,65	0,84	- 132,37	- 115,07	- 97,77	- 63,18
3,65	4,85	8,98	- 23,09	- 0,33	22,42	67,94
4,85	6,05	22,69	105,12	134,29	163,46	221,80
6,05	7,25	18,04	209,79	244,19	278,60	347,40
7,25	8,45	4,12	329,00	369,37	409,73	490,46
8,45	9,65	0,90	466,85	514,11	561,36	655,88
9,65	10,85	0,71	594,96	648,62	702,29	809,61
10,85	12,05	0,77	713,86	773,47	833,08	952,29
12,05	13,25	0,26	827,85	893,15	958,46	1.089,07
13,25	14,45	0,11	969,85	1.041,85	1.114,23	1.259,07
Total		57	17.624,25	19.732,28	21.840,30	26.056,36

\*\* Produtividade alcançada na safra de 2004/05; Cultivo de sequeiro.

\* Intervalo entre classes: 1,20 toneladas.

<sup>1</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com rendimento real;

<sup>2</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com incremento de 5 %, 10 % e 20 % no rendimento;

**Tabela 8** – Produtividade do milho, área correspondente, rentabilidade média real, para área experimental irrigada de Palmeira das Missões, RS.

Produtividade *		Área (ha)	R. Média <sup>1</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>
Média (ton ha <sup>-1</sup> )	L. mín.		(US\$ ha <sup>-1</sup> )			
L. máx. **			Real	R 5 % >	R 10 % >	R 20 % >
4,54	5,00	0,07	74,12	96,76	119,40	164,68
5,00	6,20	1,88	158,08	184,91	211,75	265,43
6,20	7,40	4,94	269,39	301,79	334,20	399,00
7,40	8,60	10,59	384,48	422,63	460,79	537,11
8,60	9,80	23,74	495,79	539,51	583,24	670,68
9,80	11,00	15,00	586,35	634,60	682,85	779,36
11,00	12,20	2,47	707,10	761,39	815,67	924,25
12,20	12,51	0,13	784,45	842,61	900,76	1.017,08
Total		58	25.429,16	27.813,94	30.198,72	34.968,27

\*\* Produtividade alcançada na safra de 2002/03;

<sup>1</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com rendimento real;

<sup>2</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com incremento de 5 %, 10 % e 20 % no rendimento;

**Tabela 9** – Produtividade do milho, área correspondente, rentabilidade média real, para área experimental irrigada de Palmeira das Missões, RS.

Produtividade *		Área (ha)	R. Média <sup>1</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>	R. Média <sup>2</sup>
Média (ton ha <sup>-1</sup> )	L. mín.		(US\$ ha <sup>-1</sup> )			
L. máx. **			Real	R 5 % >	R 10 % >	R 20 % >
3,81	5,00	0,34	0,73	23,40	46,07	91,41
5,00	6,20	2,23	102,14	129,87	157,61	213,09
6,20	7,40	8,79	226,94	260,91	294,89	362,85
7,40	8,60	27,29	332,24	371,48	410,72	489,21
8,60	9,80	18,29	434,61	478,97	523,34	612,06
9,80	11,15	1,87	534,06	583,40	632,73	731,40
Total		58	15.980,96	18.110,77	20.240,58	24.500,20

\*\* Produtividade alcançada na safra de 2003/04;

<sup>1</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com rendimento real;

<sup>2</sup> Rentabilidade média US\$ ha<sup>-1</sup>, com incremento de 5 %, 10 % e 20 % no rendimento;

Ao comparar a utilização da irrigação das áreas estudadas às de sequeiro, tem-se um aumento da produtividade na ordem de 19,79 %, o que reforça e valida a construção desses cenários teóricos, principalmente para as áreas de sequeiro. Outra maneira de incrementar a rentabilidade é a aplicação de fertilizantes à taxa variável, a qual se baseia na variabilidade

dos rendimentos e dos atributos de solo. Essa prática tem um grande potencial de racionalização no uso de insumos, em especial, no uso de corretivos e fertilizantes, o que a torna importante. Assim, a realização de interferências à taxa variável somada ao uso da irrigação pode contribuir na obtenção de melhores taxas de renda líquida por unidade de área.

Considerando a probabilidade de retorno do investimento, o cultivo irrigado mostrou-se viável para as condições climáticas do RS, e com os preços vigentes nas safras analisadas. No entanto, os rendimentos máximos obtidos sob pivô ainda estão abaixo do rendimento potencial, o que indica uma oportunidade de aprimoramento do manejo. Neste sentido, a agricultura de precisão pode contribuir espacializando as subáreas e orientando o manejo, de maneira a incrementar a rentabilidade dos cultivos em cada subárea da lavoura.

Dessa forma, os cultivos irrigados ou não, aliados à agricultura de precisão, permitem tratar localizadamente as subáreas no terreno, identificando e alocando racionalmente os recursos no sistema produtivo, através da maximização do uso da terra e de insumos agrícolas. Assim, é possível um aumento do percentual da produtividade e da rentabilidade das culturas, promovendo melhorias gradativas e sustentáveis do sistema produtivo.

## **6.6. Conclusões**

Os custos gerados no cultivo irrigado são maiores quando comparados aos de sequeiro, mas o retorno econômico é 19,79 % maior na área irrigada.

Para cada dólar investido nas áreas, o cultivo de sequeiro produziu 2,23 kg de milho a mais que o cultivo de sequeiro.

O cultivo irrigado mostrou-se viável para as condições encontradas nas lavouras estudadas, porém as produtividades podem ser maiores ainda quando corrigidas suas variabilidades, citadas nos capítulos anteriores.

É necessário um histórico maior de mapas de rendimento para que os resultados sejam mais representativos e com conclusões mais seguras.

## 6.7. Referências bibliográficas

ARRUDA, Z.J. **Eficiência econômica na alocação de recursos na agricultura**: uma avaliação de dois métodos de estimativa do ponto ótimo, visando sua aplicação prática. Campo Grande: Embrapa-CNPQC, 1982. 24 p. (Embrapa-CNPQC. Circular técnica, 7).

BALASTREIRE, L. A.. **O estado da arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba, Departamento de Engenharia Rural ESALQ/USP, 2000.

BLACKMORE, B.S.; LARSCHIED, G. Strategies for managing variability, In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE 1997, 1. 1997, Warwick,. **Proceedings...** London: BIOS Scientific, 1997. p.851-859.

BLACKMORE, S. **An introduction to precision farming**. Silsoe College, Inglaterra, 1997. Disponível em: <<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/precfarm.htm>>. Acesso em: 23 out. 2000.

CHHULLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Crop Control of crop production. **Fertilizer Research**, v.33, p. 1-34, 1992.

DOBERMANN, A.; PING, J.L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, v.96, n.1, p.285-297, 2004.

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.

GIOTTO, L; ROBAINA, A. D. ; SULZBACH, L. **A agricultura de precisão como o Sistema CR Campeiro**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural, 2004. 330 p.

KINDLER, J. Modeling derived demand for irrigation water. **Agricultural Water Management**, v.13, p.403-410, 1988.

MENEGATTI, L. A. A. – Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade. 2002. 84 f. (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v.17, n.2, p.97-107, 1997.

PARKIN, C.S.; BLACKMORE, B.S. **A precision farming approach to the application of agrochemicals**. 1995.p.7DisponívelnaInternet.[http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/B\\_AAS/BAAS.pdf](http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/B_AAS/BAAS.pdf) em 27 Jul.1999. Trabalho apresentado na British Association for the Advancement of Science meeting, University of Newcastle-upon-Tyne, September 12th, 1995.

SANAI, A. e YULE, I. J. Yield measurement reliability on combine harvesters. St. Joseph, ASAE Paper No. 96-1020, 14p.26.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Control of crop production. **Fertilizer Research**, v.33, p.1-34, 1992.

SEARCY, S.W. **Precision farming**: A new approach to crop management. Texas Agricultural Extension Service. The Texas A&M University System, 1997. p.4. Disponível na Internet. <http://agpublications.tamu.edu/pubs/eengine/15177.pdf> em 22 Mar. 2006.

TSCHIEDEL, M. ; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 2, p. 159-163, 2002.