

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA
DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE SOLO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fábio Evandro Grub Hauschild

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE SOLO

Fábio Evandro Grub Hauschild

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Área de Concentração em Tecnologias em Agricultura de Precisão, do colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agricultura de Precisão.**

Orientador: Prof. Dr. Jackson Ernani Fiorin

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Hauschild, Fábio Evandro Grub

Técnicas de agricultura de precisão para definição de zonas de manejo de solo / Fábio Evandro Grub Hauschild.- 2013.

84 p. ; 30cm

Orientador: Jackson Ernani Fiorin

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2013

1. Mapas de produtividade
2. Resistência a penetração
3. CR Campeiro I. Fiorin, Jackson Ernani II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Fábio Evandro Grub Hauschild. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletrônico: fabio@coopatrigo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Colégio Politécnico da UFSM
Programa de Pós-Graduação Profissional em Agricultura de Precisão**

A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado.

**TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE
ZONAS DE MANEJO DE SOLO**

elaborada por
Fábio Evandro Grub Hauschild

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agricultura de Precisão

COMISSÃO EXAMINADORA:

Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM)

Benjamin Dias Osório Filho, Dr. (UERGS)

Santa Maria, 13 de setembro de 2013.

DEDICATÓRIA



Fonte: Arquivo pessoal

Título: Meus queridos filhos.

Fotógrafo: Fábio Evandro Grub Hauschild.

Data: 14/07/2013.

Personagens: (da esquerda para a direita) Lynda Hauschild e Lucas Hauschild.

Comentário: Desde os primeiros passos até hoje, a alegria, o apoio, a compreensão e o amor incondicional, sempre presentes, me conduziram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas pessoas que colocou em minha vida. Todas, sem exceção, contribuíram para meu sucesso e para meu crescimento como pessoa.

A minha esposa Shirlei Sztormowski, pelo carinho, dedicação, paciência e pelas inúmeras vezes que você me enxergou melhor do que eu sou. Pela sua capacidade de entender minha ausência nas horas dedicadas aos estudos e viagens técnicas na busca da qualificação profissional.

Aos meus filhos, Lucas e Lynda, pela oportunidade de experimentar a mais pura forma de amor e por terem me acompanhado mesmo na distância, revelando-me a certeza de que todos os dias, ao lado deles, são maravilhosos.

Aos meus pais, irmãos, sogros, cunhados, sobrinhos e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

A Cooperativa Tritícola Regional Sãoluizense por ter oportunizado condições para o aprimoramento das minhas funções, demonstrando confiança na minha qualificação profissional;

Aos meus colegas de Coopatrigo pelo apoio, incentivo e pelo suporte nos momentos que estive ausente no decorrer do curso.

CCGL TEC – Cooperativa Central Gaúcha LTDA – pela parceria na implantação do projeto de pesquisa de agricultura de precisão e na condução das avaliações a campo.

Aos produtores irmãos Rogério Pieniz e Romar Pieniz pela confiança e cedência da área para a realização da pesquisa.

Ao professor orientador Jackson E. Fiorin pelo incentivo e auxílio primordial para ingressar no curso, auxiliando com seus ensinamentos didáticos e de vida para vencer este grande desafio.

Aos professores Antônio Luis Santi e Benjamin Dias Osório Filho pela participação na banca examinadora da dissertação, contribuindo para o aprimoramento desta pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de cursar na primeira turma do Mestrado Profissionalizante em Agricultura de Precisão do país.

A Coordenação e docentes do PPGAP, pelo estímulo à busca do conhecimento. Um carinho especial aos professores Telmo J. C. Amado e Elódio Sebem pelo convívio, amizade, ensinamentos e auxílio na elaboração de eventos ligados ao curso.

A todos os colegas da primeira turma do Mestrado PPGAP, pela amizade, companheirismo e troca de experiências fundamentais para o enriquecimento profissional. Um abraço especial ao colega Rodrigo Franco Dias pelo auxílio na elaboração de dados da pesquisa.

A empresa FALKER, pela disponibilidade de seus equipamentos para a avaliação da compactação do solo.

Ao estagiário de agronomia Alex Sandro Rambo Hoffmann, pela contribuição direta e irrestrita durante a execução do trabalho;

A Rejane Lopes, pela versão do abstract e correção da gramática e escrita do trabalho;

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, e não estão nominalmente citados.

Quando a gente acha que tem todas as respostas,
vem a vida e muda todas as perguntas ...

(Luis Fernando Veríssimo)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão
Universidade Federal de Santa Maria

TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE SOLO

Autor: Fábio Evandro Grub Hauschild

Orientador: Jackson Ernani Fiorin

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de setembro de 2013.

A agricultura de precisão (AP) é uma ferramenta tecnológica que avalia os atributos condicionantes da produtividade, com o objetivo de diminuir a variabilidade espacial da área, com conseqüente aumento da produtividade, trazendo também outros benefícios, como diminuição da aplicação de fertilizantes e corretivos, com ganhos evidentes ao meio ambiente. Além disso, o conhecimento das propriedades e características de solo é de extrema importância para o almejo de altas produtividades, sendo o solo um sistema anisotrópico, evidenciado na direção vertical, caracterizado pela diferenciação de camadas, denominadas horizontes. A determinação de zonas de manejo a partir de atributos físicos e dados de produtividade permite ao produtor aliar informações e conseqüentemente manejar a área de acordo com suas condições edáficas. Desta forma, esta tecnologia busca homogeneizar a variabilidade espacial existente na área, na busca do aumento da eficiência da produção, com uso eficiente de fertilizantes, corretivos, sementes e agroquímicos. O objetivo do trabalho foi determinar, através de mapas de compactação e mapas de produtividade, zonas diferenciadas de manejo em solos argilosos na região de abrangência da Coopatrigo, no município de São Luiz Gonzaga. O trabalho foi conduzido em várias etapas, sendo: Amostragem de solo georreferenciada, para a obtenção de dados de resistência a penetração, com o auxílio de um equipamento marca Penetrolog da Empresa Falker. Os dados de produtividade foram obtidos com colhedora equipada com sistema de orientação DGPS e monitor de colheita. Análise dos dados e interpretação, com a criação de mapas de compactação e produtividade, com o auxílio do sistema CR Campeiro. A determinação das zonas de manejo foi obtida através da interpolação dos dados de resistência a penetração aos dados de produtividade, definindo assim zonas homogêneas, com características físicas e de produtividade coincidentes. Com base nos resultados obtidos, a correção dos atributos químicos, tanto pH, fósforo, potássio, saturação por bases, através do processo de AP proporcionam resultados positivos, promovendo a homogeneização dos atributos. Foi possível verificar que a variabilidade aumenta com a profundidade, independentemente da variável avaliada. Os resultados de resistência a penetração indicam a existência de uma camada compactada formada a partir de 7 cm de profundidade. Além disso, a variabilidade existente na área indica zonas de maior compactação, justamente nas áreas onde a produtividade é menor. Com a sobreposição dos mapas de resistência a penetração e os mapas de produtividade foi possível criar zonas de manejo, de alta, média e baixa, levando em consideração a interação desses fatores. Assim, o manejo da área pode ser feito de forma localizada, podendo assim, o agricultor interferir para a melhoria das características físicas do solo, seja pela utilização da escarificação, ou pelo uso de plantas de cobertura, como o nabo forrageiro.

Palavras-chave: Mapas de produtividade. Resistência a penetração. CR Campeiro.

ABSTRACT

Master's Thesis
Graduate Studies Programm of Precision Farming
Federal University of Santa Maria

PRECISION FARMING TECHNIQUES FOR DEFINITION MANAGEMENT ZONES OF SOIL

Author: Fábio Evandro Grub Hauschild

Advisor: Jackson Ernani Fiorin

Local and Day of Defense: Santa Maria, September, 13 rd 2013.

Precision farming (AP) is a technological tool that assesses the attributes of productivity constraints, it aims to reduce the spatial variability of the area, with the increase of productivity, and offering other benefits such as reduced use of fertilizers and liming, with obvious positive actions to the environment. Besides, knowledge of the properties and characteristics of soil are very important to obtain high productivity, a system where the soil is anisotropic, evidenced in the vertical direction, characterized by differentiation of layers, called horizons. The determination of management zones from physical attributes and data productivity enables the farmer to combine informations and consequently handle the area according to its soil conditions. Thereby, this technology intends to homogenize the spatial variability being in the area aiming of increased production, with efficient use of fertilizers, liming, seed and agrochemicals. The objective of this research was to determine, through maps and compression yield maps, different areas of management in clay soils in the region of Coopatrigo's scope in the city of São Luiz Gonzaga. The research was conducted at many stages, such as georeferenced soil sampling to obtain data for penetration resistance, using equipment of Penetrolog Falker Company. Productivity data were obtained with a harvester equipped with DGPS guidance system and monitor harvest. An analysis of data and interpretation with creating maps of compaction and productivity, with the use of the CR Campeiro. The determination of the management zones was obtained by interpolation of data from the data penetration resistance of productivity, thus defining homogeneous zones with physical characteristics and productivity coincide. According to the results obtained, the correction of the chemical attributes, both pH, phosphorus, potassium, base saturation, through the process of AP provide positive results, making the homogenization of attributes. It was possible to find that the variability increases with depth, apart of the measured variable. The results of the penetration resistance betoken the existence of a compacted layer formed from seven inches depth. Furthermore, prevailing variability in the area indicates areas of superior compression, accurately in the zones where productivity is inferior. With the overlapping of maps of penetration resistance and yield maps was possible to create high, medium and low management zones, considering the interaction of these factors. Thus, the area management could be performed in a localized manner allowing the farmer to intervene improving the physical characteristics of the soil, or by the use of scarification, or by use of cover crop such as fodderturnip.

Key-words: Yield maps. Penetration resistance. CR Campeiro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Descrição das precipitações ocorridas no município de São Luiz Gonzaga, distrito de São Lourenço, durante os anos de 2009, 2010 e 2012.	31
Figura 2 –	Grid de amostragem utilizado na coleta das análises de solo e para avaliação dos dados de fertilidade, resistência a penetração e de produtividade.	32
Figura 3 –	Equipamento utilizado para a aplicação à taxa variada dos corretivos e fertilizantes.	37
Figura 4 –	Procedimentos realizados para a coleta de informações de resistência à penetração a partir do penetrômetro SoloStar da empresa Falker.	38
Figura 5 –	Valores de pH na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e valores de pH na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.	42
Figura 6 –	Valores de pH em reamostragem na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e valores de pH, em reamostragem na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.	43
Figura 7 –	Mapa dos teores de fósforo na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e Mapa dos teores de fósforo na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.	44
Figura 8 –	Mapa de reamostragem dos teores de fósforo na profundidade de 0-0,10 m (a) do ano de 2010 e Mapa de reamostragem dos teores de fósforo na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.	45
Figura 9 –	Mapas dos teores de potássio na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e Mapas dos teores de potássio na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.	46
Figura 10 –	Mapas de reamostragem dos teores de potássio na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e Mapas de reamostragem dos teores de potássio na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no de 2010.	47
Figura 11 –	Desenvolvimento radicular em áreas com alta resistência à penetração.	52
Figura 12 –	Resistência à penetração na profundidade de 0-0,025 m (a) no ano de 2010 e Resistência a penetração na profundidade de 0,025-0,05 m (b) no ano de 2010.	53
Figura 13 –	Resistência à penetração na profundidade de 0,05-0,075 m (a) no ano de 2010 e Resistência à penetração na profundidade de 0,075-0,10 m (b) no ano de 2010.	53
Figura 14 –	Resistência à penetração na profundidade de 0,10-0,125 m (a) no ano de 2010 e Resistência à penetração na profundidade de 0,125-0,15 m (b) ano de 2010.	54

Figura 15 – Resistência à Penetração na profundidade de 0-0,05 m (a) no ano de 2012; Resistência à penetração na profundidade de 0,05-0,10 m (b) no ano de 2012; Resistência à penetração na profundidade de 0,10-0,15 m (c) no ano de 2012 e Resistência à penetração na profundidade de 0,15-0,20 m no ano de 2012.	55
Figura 16 – Desenvolvimento radicular nas zonas de alta (a); média (b) e baixa (c) resistência a penetração.	57
Figura 17 – Mapa de produtividade na cultura do milho obtido na safra 2012/13. Cores são valores interpolados e o número é a média de produtividade de cada ponto amostrado.	59
Figura 18 – Sobreposição de dados de produtividade da cultura do milho safra 2012/13 e resistência à penetração na profundidade de 0,07-0,14 m. Cores representam os valores interpolados de produtividade e os números os valores médios de resistência a penetração.	61
Figura 19 – Mapa de altitude da área no ano de 2013	62
Figura 20 – Distribuição da resistência à penetração ao longo do perfil do solo nas zonas de baixa, média e alta produtividade na cultura do milho safra 2012/2013.	64
Figura 21 – Teores de Matéria Orgânica do solo na camada de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e Teores de Matéria Orgânica na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.	65
Figura 22 – Rendimento da cultura do milho safra 2012/13 em função da resistência a penetração na média da profundidade de 0 a 0,40 m de cada ponto amostral. ...	66
Figura 23 – Determinação de diferentes zonas de manejo a partir de dados de resistência à penetração na profundidade de 0,07 a 0,14 m e mapa de produtividade de milho safra 2012/13.	67
Figura 24 – Variabilidade da produtividade na cultura do milho safra 2012/13.	69
Figura 25 – Distribuição da área de acordo com a produtividade observada na cultura do milho safra 2012/2013.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Recomendação de calagem a partir do índice SMP. Fonte: Fiorin, 2012.	34
Tabela 2 –	Proposta de faixas de interpretação dos teores de fósforo no solo conforme o teor de argila e de potássio no solo conforme a capacidade de troca de cátions (CTC), extraídos pela solução de Mehlich’-I. Fonte: Fiorin et al. (2012).	35
Tabela 3 –	Correção dos teores de pH, fósforo e potássio, considerando a condições da área inicial, além de considerar as perspectivas futuras de condução da fertilidade da área.	36
Tabela 4 –	Análise estatística descritiva dos teores de fósforo e potássio no solo coletados nos anos de 2008 e 2010, nas profundidades 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. São Luiz Gonzaga - RS, 2012.	48
Tabela 5 –	Análise dos efeitos das zonas de produtividade, na produção média da cultura do milho safra 2012/13.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	– Agricultura de Precisão
CC	– Capacidade de Campo
K	– Potássio
KPa	– Quilo Pascal
MO	– Matéria Orgânica
P	– Fósforo
pH	– Potencial de Hidrogênio
RP	– Resistência a Penetração
S	– Sul
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria
W	– Oeste
%V	– Saturação de bases

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Mapa de aplicação para correção de Super Fosfato Triplo no ano de 2008.	77
APÊNDICE 2 – Mapa de aplicação para correção de Calcário no ano de 2008.	78
APÊNDICE 3 – Mapa de aplicação para correção de Cloreto de Potássio no ano de 2008...	79
APÊNDICE 4 – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Calcário no ano de 2011.	80
APÊNDICE 5 – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Super Fosfato Triplo no ano de 2011.	81
APÊNDICE 6 – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Cloreto de Potássio no ano de 2011.	82
APÊNDICE 7 – Mapas de Saturação de bases na profundidade 0-0,10 m (a) no ano de 2008; Saturação de bases na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008; Saturação de bases na camada de 0-0,10 m (c) no ano de 2010 e Saturação de bases na camada de 0,10-0,20 m no ano de 2010.	83
APÊNDICE 8 – Mapa de Argila na profundidade 0-0,10 m (a) no ano de 2008; Argila na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008; Argila na camada de 0-0,10 m (c) no ano de 2010 e Argila na camada de 0,10-0,20 m no ano de 2010.	84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVO GERAL	17
2.1 Objetivos específicos.....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1 Agricultura de precisão.....	19
3.2 Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	22
3.3 Atributos físicos do solo	24
3.3.1 Resistência à penetração	25
3.3.2 Densidade do solo.....	27
3.4 Mapas de produtividade	27
3.5 Definição de zonas de manejo.....	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1 Descrição da área experimental	30
4.2 Análise dos atributos químicos e correção a taxa variável	33
4.3 Determinação dos dados de resistência à penetração.....	37
4.4 Obtenção dos mapas de produtividade.....	39
4.5 Definição de zonas de manejo.....	39
4.6 Tratamento dos dados	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Análise da intervenção dos atributos químicos do solo.....	42
5.2 Análise dos atributos físicos e de produtividade para definição de zonas diferenciadas de manejo.....	50
6 CONCLUSÕES.....	72
7 CONSIDERAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

A economia globalizada exige que a agricultura brasileira desenvolva tecnologias que possibilitem a competitividade em nível mundial, através do aumento de produtividade das culturas. Frente a isso, a Agricultura de Precisão (AP) emerge como uma moderna ferramenta, no gerenciamento das atividades agrícolas, caracterizando-se pela tomada de decisões com base na análise de um conjunto de informações, de modo a aumentar a eficiência da cadeia produtiva.

Com isso, a AP surge para auxiliar o produtor na escolha das melhores estratégias de manejo, permitindo identificar a variabilidade presente na área e, a partir disso, averiguar os fatores limitantes, propondo alternativas de manejo diferenciado de acordo com as necessidades de cada zona de manejo (PES et al., 2006). Neste cenário, busca-se fundamentar os conceitos de zonas de manejo a partir de um conjunto de informações localizadas e utilizando-se de ferramentas de AP, que através de uma interpretação sistêmica resulte num conjunto de ações para o manejo localizado da lavoura.

O objetivo da AP é analisar a variabilidade existente na área, combinar a aplicação de recursos e práticas agronômicas com atributos do solo e exigências da cultura. Para Lemainski (2007), a AP 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 possui condições diferentes.

A definição de técnicas para a determinação de zonas de manejo é ainda bastante recente no Brasil. A principal preocupação é interpretar a grande quantidade de dados gerados e transformá-los em informações úteis para a definitiva tomada de decisões, possibilitando a correção da variabilidade espacial existente nas lavouras. Além disso, a variabilidade está relacionada a mais de um fator, o que torna ainda mais difícil a definição de zonas de manejo. Com base nisso, é necessário interpolar diferentes dados, tanto químicos, físicos e de produtividade, a fim de obter zonas homogêneas, possibilitando um manejo diferenciado.

Conhecer a variabilidade dos atributos do solo é ferramenta importante no contexto da AP. Problemas básicos de manejo, principalmente no que diz respeito aos atributos químicos do solo, já se encontram amenizados através do uso de corretivos e fertilizantes à taxa variável. Porém, ainda se observa a variabilidade de produtividade em algumas áreas, o que

gera a necessidade de um estudo detalhado que considere a interação de outros atributos do solo que possam influenciar a produtividade das culturas.

Entre os atributos que ainda merecem serem estudados, os atributos físicos do solo necessitam de maior atenção por parte dos produtores, principalmente em solos argilosos suscetíveis à compactação. Atualmente, a evolução da tecnologia tem trazido grandes benefícios à agricultura, entretanto, trouxe alguns percalços. A invenção de máquinas com grande capacidade de trabalho, porém com elevado peso, pode ocasionar problemas de compactação. Isso limita o desenvolvimento das culturas implantadas, sendo a AP uma das ferramentas que podem ser utilizadas para identificar essas áreas e buscar corrigi-las.

Considerando o exposto, a proposta deste trabalho é avaliar a intervenção química do solo e definir zonas diferenciadas de manejo utilizando as técnicas de AP. Acredita-se que a associação das informações geradas pelos mapas de produtividade e de atributos físicos do solo, seja possível definir zonas de manejo e que possibilitem realizar intervenções localizadas nas propriedades físicas do solo, através de práticas mecânicas e/ou culturais, de forma a garantir melhorias na produtividade e rentabilidade das lavouras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a intervenção química do solo através de técnicas de AP e definindo zonas diferenciadas de manejo, utilizando informações de mapas de produtividade e de atributos físicos do solo, de forma que possibilite realizar intervenções localizadas e garantir melhorias na produtividade e rentabilidade das lavouras da região de abrangência da COOPATRIGO.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar as condições químicas do solo, bem como a influência do manejo à taxa variada de corretivos de acidez e fertilizantes;

- Apresentar a variabilidade das condições físicas do solo e da produtividade da área avaliada;
- Buscar identificar zonas diferenciadas de manejo de alta, média e baixa produtividade podendo assim, adotar medidas de intervenção para cada zona de produção a partir de mapas de produtividade e resistência a penetração.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Agricultura de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) é um termo que identifica o manejo preciso de pequenas unidades de terra em contradição ao manejo tradicional, onde toda a área é considerada homogênea, recebendo o mesmo manejo. Nada mais é que, identificar a variabilidade existente na lavoura e eliminá-la com a aplicação de técnicas que diminuam ou eliminam essa variabilidade, seja causado por fatores químicos, físicos ou biológicos. A utilização de mapas de produtividade completa o ciclo da AP, onde esses dados podem ser comparados tanto com mapas de fertilidade química, como de fertilidade física, caracterizando as zonas de manejo.

Segundo Lemainski (2007), a AP consiste em ferramentas de gerenciamento agrícola, cujo objetivo é aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas e subáreas agrícolas. De acordo com Knob (2006), a AP se baseia no conjunto de técnicas que explora a variabilidade do terreno através de informações georreferenciadas da área, principalmente no que se refere a atributos químicos, físicos, biológicos e da produtividade.

Esta tecnologia de manejo e gerenciamento já é praticada há muitos anos. Segundo Shiratsuchi (2001), a AP foi inicialmente praticada pelos pesquisadores Linsley e Bauer da Universidade de Illinois, Estados Unidos da América do Norte, ainda no ano de 1929. Os pesquisadores realizaram o tratamento localizado da correção do pH de uma área de 17 hectares com base em dados de 23 amostras de solo ordenadamente coletadas. Porém, devido à inexistência da mecanização e pelo limitado tamanho da área, a aplicação foi realizada manualmente.

Com o advento da revolução verde, as técnicas de AP foram esquecidas, pois naquela época, o tratamento localizado possível era inviável em áreas extensas. A partir de 1980, a invenção de novas tecnologias, como o computador, softwares de sistemas de informações geográficas, sensores e técnicas de produção tornaram viável a utilização das técnicas de AP. Contudo, todas estas recentes evoluções tecnológicas nos diversos campos possibilitaram que a automação de processos e sistemas se tornasse realidade, possibilitando a prática de AP. (SHIRATSUCHI, 2001).

A necessidade do aumento da produção, de maneira a alcançar competitividade no mercado internacional, torna a AP de grande importância na busca de tecnologias e de manejos específicos que otimizem a produtividade e a rentabilidade das lavouras. Knob (2006) admite a AP como um novo paradigma na gestão das atividades agrícolas, segundo o qual, as áreas de produção não são tratadas como sendo homogêneas. Desta forma, permite caracterizar zonas diferenciadas e que devem ser tratadas de maneira isolada, com o objetivo de alcançar níveis de elevada fertilidade, aliado a economia na aplicação de fertilizantes e corretivos.

Nas Regiões Noroeste e Missões do Estado do RS observa-se, ao longo dos anos, a ocorrência de períodos com déficit hídrico no verão afetando de maneira significativa a produtividade das culturas. Além disso, predominam solos com textura argilosa, em que as condições físicas são muito sensíveis ao manejo adotado. Em trabalho realizado por Fiorinet al. (2007), observou-se que, além da necessidade de correção dos indicadores da fertilidade do solo, a condição física do solo encontra-se acima dos níveis críticos, sendo que 36,0% e 69,6% das propriedades rurais pesquisadas apresentam-se em situação preocupante de compactação nas camadas 0 a 0,07 m e 0,07 a 0,14 m, respectivamente.

A Cooperativa Triticola Regional Sãoluizense Ltda. - COOPATRIGO, preocupada com a situação apresentada, em 2008, iniciou um Projeto de AP, oferecendo a tecnologia para os produtores associados, nos 10 municípios da sua região de abrangência. Até o momento já foram mapeados mais de 19.020 hectares e corrigidos por taxa variável mais de 15.000 hectares, beneficiando mais 230 produtores associados da cooperativa.

Observaram-se melhorias significativas na produtividade das culturas e um grande nível de satisfação dos produtores envolvidos. No entanto, no terceiro ano do processo de AP, constatou-se que além dos problemas químicos de solo já manejados, também há outros fatores influenciando na variabilidade do solo e conseqüentemente na produtividade das culturas. Aliado a isto, em uma área de pesquisa pertencente ao Projeto Cooperativo de Agricultura de Precisão (APcoop), conduzido na região de atuação da COOPATRIGO, em São Luiz Gonzaga, através do Convênio da CCGL TEC em parceria com UFSM, constatou-se níveis de compactação acima dos considerados críticos.

Várias pesquisas já foram realizadas com enfoque na AP e muitas das dúvidas já foram elucidadas. Todavia, alguns estudos ainda mostram que a falta de controle dos atributos físicos do solo tem comprometido o desempenho de algumas lavouras, uma vez que áreas com histórico de fertilidade adequada ainda apresentam produtividades relativamente baixas. Assim, torna-se pertinente o monitoramento não só dos atributos químicos, como também da

qualidade física dos solos cultivados. O conhecimento e manejo adequado dos atributos físicos tornam-se ferramentas de grande importância para atingir elevada produtividade nas áreas cultivadas.

Nos últimos anos, verifica-se uma crescente pressão no setor agrícola em busca do aumento da eficiência e do aperfeiçoamento das ferramentas produtivas disponíveis. Neste contexto, a AP permite identificar a variabilidade existente na área e a partir disto investigar fatores limitantes (físicos, químicos e biológicos) e propor alternativas de manejo diferenciadas de acordo com a necessidade de cada área produtiva. Segundo Amado e Santi (2007), a AP se propõe a aumentar a eficiência da atividade agrícola, com base no manejo localizado, respeitando a variabilidade presente na área, tanto em nível de solo, planta e micro clima.

O ciclo operacional da AP envolve um caminho de coleta de informações, interpretação e diagnóstico. A coleta de informações é de extrema importância, pois sua qualidade permitirá obter resultados precisos e confiáveis. Da mesma forma, a interpretação dos dados deve ser realizada por profissional qualificado, utilizando de ferramentas que proporcione elevado grau de precisão. Conforme Bellé et. al., (2000), todas essas informações, a começar pelos mapas de produtividade ou fertilidade, envolvem uma riqueza de detalhes fazendo com que esse conjunto de informações passe a ser o centro de todo gerenciamento da propriedade.

A AP pressupõe a elaboração e utilização de mapas que representem as características e atributos de uma determinada área agrícola. Eles representam espacialmente a variabilidade dos atributos do solo, produtividade e características da cultura, tornando-se base na tomada de decisões que envolvem o manejo localizado das áreas. Segundo Kilpp (2002), na identificação das causas da variabilidade sobre a produção em um talhão, em uma primeira etapa, os mapas devem ser utilizados para estabelecer as razões óbvias dos fatores limitantes da produtividade. Em uma segunda etapa, devem-se analisar propriedades físicas do solo, como forma de explicar a variabilidade encontrada nos mapas, mesmo depois de corrigidos quimicamente.

A variabilidade na produtividade de uma cultura dentro do campo pode ser inerente ao solo, clima ou induzida pelo manejo. Entre modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo causadas por práticas de manejo, estão: a compactação do solo pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas e a variabilidade no estande das culturas e nos teores de nutrientes no solo devido à aplicação desuniforme de sementes, fertilizantes ou corretivos (PLANT et al., 1999). Desta forma, há a necessidade de estabelecer relações entre a

produtividade das culturas e as propriedades do solo, bem como de outras variáveis, definindo os principais fatores de influência, possibilitando a definição de zonas diferenciadas de manejo. A integração de atributos químicos, físicos e biológicos do solo, combinada com as informações dos mapas de produtividade, é possivelmente a alternativa mais completa na investigação da variabilidade espacial das lavouras (MOLIN, 2002; SANTI, 2007).

Para o MAPA (2011), a estratégia de AP que leva em consideração variabilidade na produção, é ampla e elaborada e considera as plantas, pois leva em consideração a produtividade das culturas anteriores para se fazer a reposição dos nutrientes extraídos. É uma abordagem que exige a geração dos mapas de produtividade, portanto exige mais equipamento, mais trabalho e maior domínio por parte do usuário ou de seu consultor. É uma estratégia que demanda mais tempo para a construção de um consistente conjunto de dados, mas a solução é proporcionalmente mais acertada por considerar também a variabilidade da produtividade da lavoura e não apenas aquela do conteúdo de nutrientes no solo.

Dados de produtividade expressos por mapas são fundamentais e a interpretação da variabilidade presente nas lavouras é evidenciada nos mapas de produtividade, implica em uma relação entre causas e efeito (MAPA, 2011).

A geração de mapas de produtividade exige certa sofisticação para a obtenção dos dados essenciais. O mapa é composto por um conjunto de pontos e cada ponto representa uma pequena porção da lavoura delimitada pela largura da plataforma da colhedora e pela distância entre duas leituras. Coleta-se, dentre outros, a quantidade de grãos colhidos naquele ponto, a umidade dos grãos, os parâmetros da área (largura da plataforma de corte e velocidade de deslocamento), e a posição gráfica do ponto.

3.2 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

Entre as ferramentas para a aplicação das práticas de AP, o sistema de posicionamento global é de crucial importância, permitindo a posição georreferenciada com precisão suficiente em todos os pontos e porções escolhidas dentro da área agrícola. Um sistema que atende a esse requisito foi desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América do Norte e recebeu o nome de sistema de posicionamento global – GPS (Global Positioning System). (SHIRATSUCHI, 2001).

O sistema de posicionamento global consiste na triangulação de um conjunto de satélites, normalmente 24 satélites, que através do cálculo da distância entre eles baseada na diferença de tempo de transmissão dos sinais entre o receptor do usuário e os satélites determinam o posicionamento terrestre. São necessários no mínimo três satélites para o posicionamento, sendo que os receptores normalmente utilizam quatro satélites.

O GPS foi inicialmente destinado para fins militares, nos Estados Unidos. Porém, o sinal possuía acesso restrito, sendo acrescido de ruídos propositais para os civis. Atualmente, o sinal é disponibilizado sem degradação para os civis, aumentando significativamente a precisão dos equipamentos receptores do sinal GPS.

Com a retirada do erro proposital, os equipamentos que possuíam pouca precisão com erro de posicionamento que podiam chegar a 100 m, atualmente são mais precisos e possuem erros de aproximadamente 20 m, da mesma forma que equipamentos com correção diferencial, que antes da retirada do erro gravavam posicionamento com erro de até 6 m, possuem hoje uma precisão com erros de 2 a 3 centímetros. Desta forma, a implementação dos sistemas de posicionamento favorecem a aplicação das técnicas de AP, facilitando as avaliações e recomendações.

Os sistemas de informação geográfica (SIGs) consistem na aplicação de softwares que analisam os dados espaciais obtidos a campo, sendo uma ferramenta de manipulação, ou um modo de digitalização de mapas, possibilitando a organização dos dados obtidos a campo e determinar um diagnóstico das variáveis estudadas. De acordo com Shiratsuchi (2001), cada conjunto de dados é agrupado em mapas, como por exemplo, o mapa de fertilidade dos solos, de tipos de solos, topografia, pragas, plantas daninhas, doenças, umidade, etc.

Atualmente, o SIG é a principal ferramenta utilizada para o entendimento dos dados de distribuição espacial com grande número de informações, elaborando mapas dos diversos atributos, com a finalidade de entender a variabilidade espacial existente nas áreas.

Entre os sistemas de Informação Geográfica, o CR Campeiro atua como um gerenciador de informações, facilitando o manuseio do grande número de informações coletadas nos projetos de AP. Além disso, o sistema permite gerenciar essas informações, de maneira a facilitar a aplicação das técnicas de AP. O Sistema de Gerenciamento Agropecuário CR Campeiro apresenta rotinas de agricultura de precisão, que possibilitam a geração e a edição de mapas dos atributos avaliados, a partir de dados georreferenciados (Giotto et al., 2004).

3.3 Atributos físicos do solo

Pouca importância tem se dado aos atributos físicos do solo, atribuindo-se a produtividade as condições químicas do solo. Porém, nos últimos anos, estudos direcionados aos parâmetros edáficos indicam a relação direta da compactação com a redução da produtividade, principalmente com o advento do sistema de plantio direto. Em sistemas de semeadura direta tem sido observado aumento da densidade do solo superficial, tendo como consequência maior resistência à penetração ou índice de cone (VIACHESLAV; MOLIN, 2006).

O processo de compactação caracteriza-se por mudanças resultantes de aumento de densidade, decréscimo no volume de macroporos, infiltração e movimento interno de água mais lentos e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes, limitando assim o satisfatório desenvolvimento das culturas implantadas. Segundo Molin (2002), as principais causas da compactação estão relacionadas aos sistemas de manejo adotados, onde a perda da matéria orgânica causa o adensamento do solo, influenciando diretamente em sua resistência à penetração. Além disso, o uso de máquinas e implementos pesados acaba agravando a condição de compactação dos solos, principalmente devido às condições de trabalho inadequadas, como o excesso de umidade.

A compactação do solo gera substancial alteração da sua estrutura, desencadeando a reorganização das partículas e de seus agregados, podendo limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, as trocas gasosas e o crescimento do sistema radicular, resultando no decréscimo da produtividade das culturas (ROQUE et al., 2008).

A determinação do grau de compactação dos solos pode ser obtida de diferentes formas, diretamente, ou de maneira indireta. Os métodos diretos são bastante trabalhosos, exigindo mão-de-obra e tempo, sendo inconveniente para aplicação em AP. Entre os métodos indiretos, a utilização de penetrômetros, com a determinação da resistência a penetração, possibilita obter de maneira rápida e prática, dados de compactação de solo.

Ainda no que diz respeito aos aspectos da variabilidade do solo, em se tratando dos atributos físicos, algumas regiões encontram-se em níveis bastante preocupantes. Segundo Fiorin et al. (2007), a condição física dos solos das propriedades na região Noroeste das Missões do RS é muito preocupante, em especial na camada de 0,07 a 0,14 m, onde 69,6% das propriedades apresentaram valores de compactação acima do nível crítico.

Para diagnóstico de áreas com problemas físicos de solo dentro de cada gleba, faz-se necessário criar mapas para avaliar os níveis de compactação. Santi et al. (2006), ressalta que é preciso estratificar espacializar na forma de mapas os resultados obtidos das leituras realizadas utilizando o penetrômetro e GPS (avaliação georreferenciada). Isto se mostra como uma estratégia racional e eficaz na identificação, a campo, de problemas oriundos da compactação do solo, sendo bastante prática e aplicável a realidade da AP.

A análise geoestatística da variabilidade do solo pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade dos atributos do solo sobre a produção agrícola, como também para aumentar sua resposta às diversas práticas culturais empregadas (TRANGMAR et al., 1985). Assim, a comparação inicial de mapas dos atributos físico-químicos do solo com os mapas de produtividade de grãos, tem o objetivo de verificar a inter-relação espacial entre os fatores causadores da variabilidade, a fim de atestar os sítios e definir as zonas de manejo específico de cada talhão.

Os resultados obtidos por Santi et al. (2006), já apontam como uma grande potencialidade, o mapeamento da compactação do solo constituindo uma ferramenta prática e rápida para agregar informações sobre as condições físicas do solo em áreas de lavoura.

3.3.1 Resistência à penetração

Entre as propriedades físicas afetadas pela compactação, a resistência à penetração (RP) tem sido bastante estudada, com a utilização de equipamentos, denominados penetrômetros. De acordo com Molin et. al., (2011), o uso de penetrômetros para fins de diagnóstico de compactação do solo em grandes áreas exige tempo e dispêndio de mão-de-obra e, com as práticas de agricultura de precisão, a amostragem passa a ser georreferenciada e em grande quantidade.

A RP tem sido adotada como indicativo da compactação do solo, por apresentar relações diretas com o desenvolvimento das plantas e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação do solo. Sendo assim, a avaliação e o monitoramento das camadas de impedimento químico do solo ao desenvolvimento radicular, tornam-se ferramenta importante para caracterizar a evolução de sistemas agrícolas (CHERUBIN et al., 2011).

Conforme Molin e Silva Júnior (2004), a medida da RP serve para identificar o estado de compactação do solo. Os penetrômetros são instrumentos de medida que caracterizam a

RP por um método uniforme padrão. A pressão necessária para cravar um cone circular de 30 graus até uma determinada profundidade no solo, expressa em Mega Pascal (MPa), é um índice da resistência do solo chamado de índice de cone (MOLIN e SILVA JÚNIOR, 2004).

Ainda não é consenso entre os pesquisadores o valor de RP que seja limite ao desenvolvimento de raízes e produtividade das culturas, variando principalmente em função da espécie vegetal. Em geral, adota-se o valor de 2000 KPa como crítico ao desenvolvimento radicular, estando a umidade do solo na condição de CC. Porém, para a análise das condições físicas do solo, devem ser levados em consideração os dados de umidade do solo na condição de CC, sendo que na prática as medições quase nunca são realizadas quando o solo encontra-se nesta condição (CHERUBIN, 2011).

Gomes e Filizola (2006) apud Singh et al., (1992), classifica a compactação, levando em consideração índices de RP, onde:

- 0 – Ambiente ótimo ou não limitante ao enraizamento (resistência à penetração <1,0 MPa);
- 0,5 – Ambiente bom com pouca limitação ao enraizamento (resistência à penetração entre 1,0 a 2,0 MPa);
- 1 – Ambiente restritivo ao enraizamento e não adequado ao crescimento de plantas (resistência à penetração > 2,0 MPa).

A determinação dos limites de RP geralmente ocorre em condições experimentais controladas em laboratório ou casa de vegetação. Reichert et al. (2007), apud Canarache (1990) sugeriu alguns limites de RP considerando o crescimento radicular, sob condições de laboratório. Valores < 2,5 MPa não apresentariam limitações ao crescimento radicular; valores entre 2,6 e 10 MPa causariam algumas limitações e valores superiores a 10 MPa não possibilitariam o crescimento radicular. Além de Taylor et al., (1966), que trabalhando em condições controladas, indicaram $RP > 2$ MPa como restritiva.

Segundo Reichert et al., (2007), trabalhos experimentais realizados no campo com vistas em obter uma resistência crítica ou restritiva as plantas expressam, com mais segurança, a situação a que realmente as plantas estão sujeitas, como condições climáticas diferenciadas durante seu ciclo e heterogeneidade e bioporosidade do solo. Trabalhando no campo, Reichert et al. (2007), apud Laboski et al., (1998), estabeleceram como valor restritivo 3,0 MPa.

3.3.2 Densidade do solo

Entre os atributos físicos, a densidade do solo acaba sendo o de maior relação com o processo de compactação. A diminuição de volume de macroporos interfere diretamente na aeração do solo, bem como no desenvolvimento radicular, sendo que em solos de elevada densidade, possíveis déficits hídricos são mais corriqueiros. Entre as propriedades físicas, o teor de argila é a que mais influencia na densidade do solo, e conseqüentemente a sua suscetibilidade à compactação.

Segundo Jimenez et. al., (2008), em solos compactados o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial de água, enquanto em solo úmido gera falta de oxigênio, com conseqüente produção de etileno na zona de crescimento radicular. Desta forma, a agregação excessiva das partículas de solo, impede o crescimento normal das raízes, levando a modificações morfológicas e fisiológicas.

O processo de compactação promove modificações na estrutura do solo, tendo efeito direto na produtividade das culturas. Essas modificações de importância agrônômica que ocorrem em solos compactados dizem respeito aos seguintes fatores: aumento da resistência mecânica à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e nutrientes.

3.4 Mapas de produtividade

A evolução tecnológica, tanto dos equipamentos, como da qualificação profissional, permitiu a geração de mapas de produtividade, ferramenta que auxilia de forma eficaz na definição de zonas de manejo. Além disso, a possibilidade de obter dados instantâneos induz ao profissional aliar estes dados a outras características, tanto químicas, físicas e biológicas.

De acordo com Molin (2007), o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras. Sendo assim, a determinação da variabilidade é mais facilmente visualizada a partir da produtividade expressa, podendo assim, ser associado com outros fatores que podem estar interferindo expressão do potencial de rendimento da cultura.

De acordo com Giotto et al., (2006), a pesquisa em relação aos mapas de produtividade desenvolve-se na atualidade, principalmente com dois focos: o foco relativo à indústria/mecanização, com estudos de sensores de rendimento e demais instrumentação compatível, que são instalados em colhedoras que também são equipadas com sistema de geoposicionamento (GPS). O outro foco tange aos aspectos agronômicos, que concentra estudos, de impacto da tecnologia na gestão da lavoura, com os objetivos de caracterizar e definir a importância e metodologia de aplicação e análise dos mapas de rendimento.

O mapeamento da produtividade é considerado parte essencial no gerenciamento da AP. Um mapa de produtividade evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas não explica a causa de tal variação, que pode ser por doenças, por baixo pH, por estresse hídrico entre outras. Deste modo, o mapeamento da produtividade é mais uma ferramenta da AP, e é necessária a avaliação dos demais fatores determinantes da produtividade.

A coleta automática de dados permite que uma grande quantidade de dados seja obtida com custo relativamente baixo (TRABACHINI, 2007). Os mapas de produtividade são elaborados a partir de dados coletados automaticamente, existindo um considerável número de erros sistemáticos introduzidos, sendo que apenas alguns desses erros são eliminados por determinados programas computacionais (MOORE, 1998 apud TRABACHINI, 2007). Assim, os dados brutos devem ser analisados cuidadosamente, objetivando evitar erros na determinação da produtividade, bem como na formação dos mapas de produtividade.

A geração dos mapas de produtividade exige obtenção de dados essenciais e de acurácia. O mapa é composto de pontos, sendo que cada um desses representa uma pequena porção da lavoura, delimitada pela largura da plataforma e pela distância entre dois pontos. São coletadas informações como, a quantidade de grãos colhidos naquele ponto, a umidade dos grãos, os parâmetros de área e a posição geográfica do ponto. Assim, é possível formar o mapa de produtividade, com informações de produtividade georreferenciados, sendo corrigidos fatores, como umidade dos grãos, transpasse da plataforma e pontos coletados nas bordaduras e no momento da descarga dos grãos.

3.5 Definição de zonas de manejo

Para a construção de uma zona de manejo, é necessária a visualização da variabilidade espacial e temporal dos fatores edafoclimáticos de cada área agrícola, considerando as

peculiaridades de cada parte da área no momento do manejo, ao invés de manejá-la como se a mesma fosse uniforme.

A determinação de zonas de manejo não deve apenas ser baseada em aspectos químicos do solo, ou tão somente as características físicas do mesmo. Desta maneira, a utilização de mapas de produtividade torna-se de fundamental relevância no diagnóstico da agricultura de precisão. A associação de mapas de produtividade com os de diferentes propriedades do solo já é utilizada na recomendação de aplicação localizada de insumos. Segundo Santi (2007), a determinação da variabilidade de rendimento de grãos torna-se uma ferramenta importante para a tomada de decisões no manejo, além de possibilitar o conhecimento dos fatores determinantes do rendimento.

Lark et al. (1999), apud Molin (2002), consideram que a análise de uma sequência de mapas de produtividade é uma forma de definir unidades de manejo em um talhão, associando-as às características de solo. Os aspectos que suscitam maiores dúvidas estão relacionados em como interpretar tanta informação e transformá-la em ferramentas que auxiliem na tomada de decisões para o correto tratamento da variabilidade espacial inegável das lavouras brasileiras. Essa variabilidade que se expressa na colheita, em termos de diferenças de produtividade ao longo da lavoura, tem causas variadas e de maneira alguma pode ser atribuída a um ou a outro fator isoladamente (MOLIN, 2002).

A integração de modelos digitais de atributos químicos, físicos e biológicos do solo, combinada com a espacialização da produtividade, é possivelmente a alternativa mais completa para o aprimoramento do manejo do solo. LIMA & SILANS (1999), apud ALBA et al, (2011).

Existem diferentes ferramentas que auxiliam na definição das unidades de manejo. Johannsen et al. (2000), apresentam uma visão do uso combinado do sensoriamento remoto para obter índices de vegetação associados a outros recursos como a amostragem de solo em grade e condutividade elétrica do solo. Com isso é possível identificar regiões de maior e menor estresse das plantas causado por falta ou excesso de água, pressão por invasoras, efeitos da erosão ou deficiência de nutrientes. Fleming et al. (1999), utilizaram fotos aéreas em solo nu para que o agricultor traçasse as unidades de manejo com base na cor do solo, topografia e experiência pessoal. Uma análise de agrupamento de parâmetros de fertilidade química, textura e condutividade elétrica do solo mostraram boa reprodutividade nas regiões demarcadas (MOLIN, 2002).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido utilizando-se de uma área comercial de um produtor associado da Cooperativa Triticola Regional Sãoluizense Ltda - COOPATRIGO, que está sendo manejada com técnicas de Agricultura de Precisão. A área situa-se na localidade de São Lourenço das Missões no município de São Luiz Gonzaga, pertencente à Mesorregião Noroeste, também conhecida como Missões, no Estado do Rio Grande do Sul.

O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfa – temperado chuvoso, com precipitação média anual elevada e bem distribuída ao longo do ano, e subtropical do ponto de vista térmico. A temperatura média anual é próxima a 18°C, com máximas no verão podendo atingir 41°C e mínimas no inverno atingindo valores inferiores a 0°C (MORENO, 1961).

Nessa região, o relevo é suave ondulado, com predominância de solos de textura argilosa, bem drenados, profundos a muito profundos. De acordo com Embrapa (2006) o solo da área estudada classifica-se como Latossolo Vermelho Distrófico típico, apresentando saturação por bases baixa ($V < 50\%$) e teores de óxidos de ferro (Fe_2O_3) na faixa entre 18 a 36%, nos primeiros 100 cm do horizonte B. Pertencente à Unidade de Mapeamento Santo Ângelo (BRASIL, 1973).

A área possui 46,69 hectares, situada no meridiano 54 entre as coordenadas geográficas (WGS84) 28,47287 (S) a 28,48312 (S), e 48,77115 (W) a 48,75977 (W), com altitude aproximada de 275 metros. A área é de propriedade dos irmãos Rogério Pieniz e Romar Pieniz, sendo pioneira na região, onde se iniciou, em abril de 2008, o Programa de AP da COOPATRIGO. Nesta área também está alocada a pesquisa pertencente ao Projeto Cooperativo de Agricultura de Precisão do Rio Grande do Sul (APcoop), servindo como área piloto de pesquisa do convênio com a Cooperativa Central Gaúcha Ltda. (CCGL TEC/FUNDACEP), em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria.

A área vem sendo conduzida desde o ano de 1995 sob o sistema de plantio direto na palha, incluindo o manejo de rotação de culturas. O talhão foi conduzido a partir de junho de 2008 na seqüência das seguintes culturas: milho, milho safrinha, aveia preta (cobertura), soja,

trigo, soja, trigo, soja, trigo, soja, aveia preta, milho e soja safrinha e atualmente com a cultura do trigo.

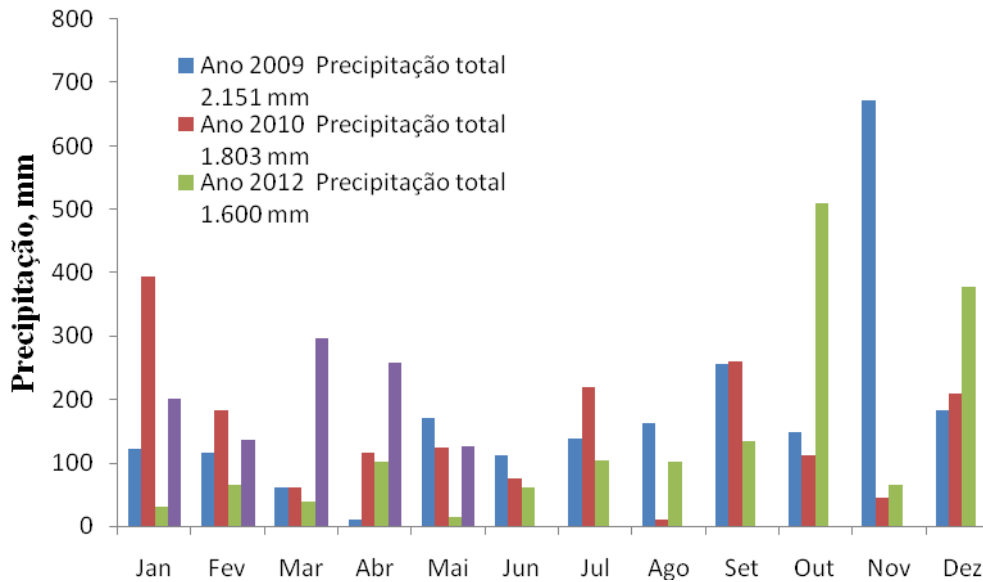


Figura 1 – Descrição das precipitações ocorridas no município de São Luiz Gonzaga, distrito de São Lourenço, durante os anos de 2009, 2010 e 2012.

Conforme a figura 01, as condições de precipitação foram favoráveis em ambas as safras agrícolas, com um acumulado de chuvas bastante expressivo. Porém, é importante ressaltar, que na fase inicial de desenvolvimento foram evidenciadas perdas de produtividade pela ocasião de baixas precipitações, prejudicando principalmente as áreas mais baixas, tendo conseqüentemente afetado a produtividade nesses locais.

No manejo e condução do sistema de AP na área, iniciada em 2008, utilizou-se as ferramentas de: amostragem georreferenciada do solo e de resistência a penetração; interpretação dos atributos químicos e físicos; elaboração de mapas de condições químicas e físicas; recomendação e aplicações de corretivos e fertilizantes a taxa variada; elaboração de mapas de produtividade.

Conforme grid amostral (figura 02) foram gerados 41 pontos de amostragem, utilizados para identificar a variabilidade dos atributos químicos do solo. No processo de amostragem, em cada ponto foram coletados 15 subamostras em torno do ponto georreferenciado, sendo esta distância duas vezes o erro oferecido pelo aparelho de GPS, ficando assim a um raio aproximado de 10 m do ponto central de amostragem.

Para a geração do grid da malha amostral, primeiramente realizou-se a demarcação da área, percorrendo seu perímetro com auxílio do GPS Garmin, para então determinarmos a área e o grid de amostragem a ser utilizado através do software CR Campeiro.

Para fins de estudo da pesquisa foram utilizados somente as determinações de pH, P, K, e MO. Já os atributos (% V e Argila) do solo estão em anexo no apêndice para visualização.

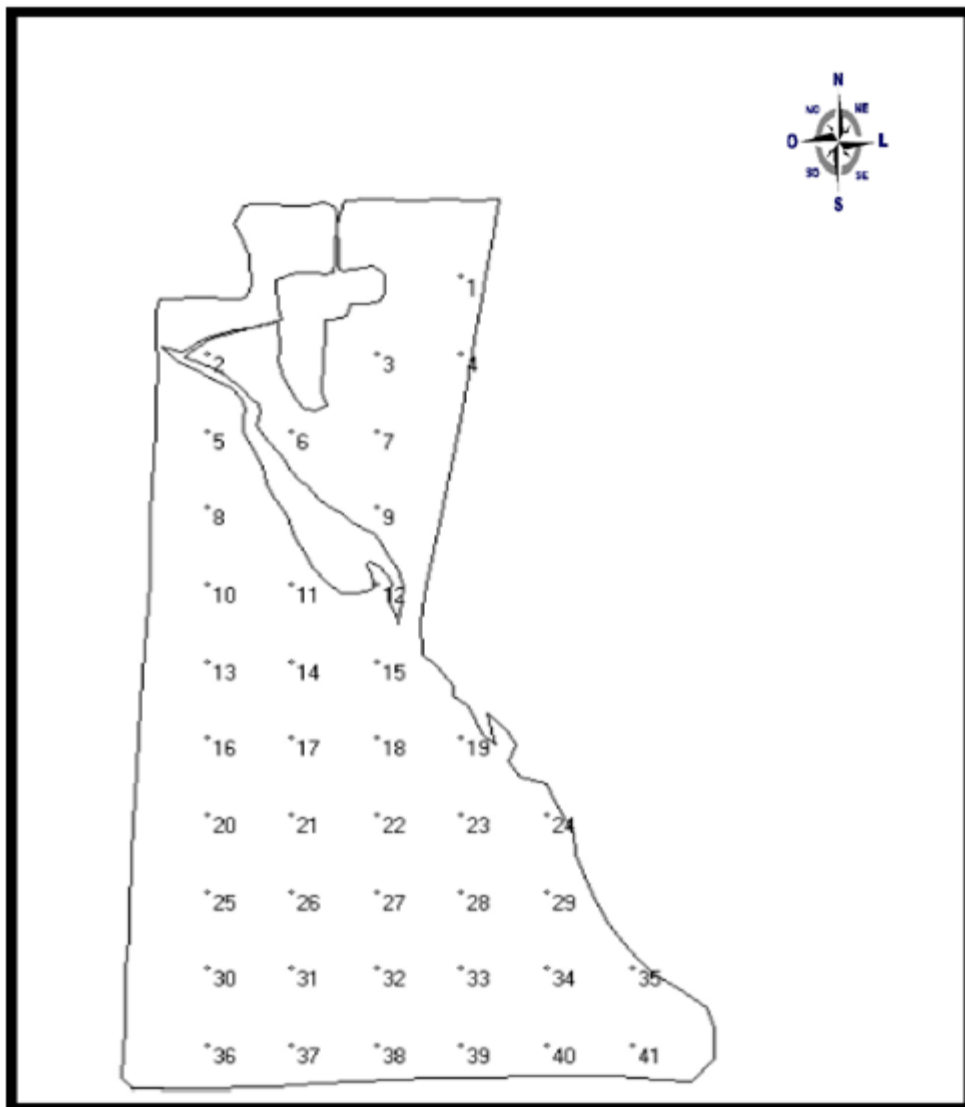


Figura 2 – Grid de amostragem utilizado na coleta das análises de solo e para avaliação dos dados de fertilidade, resistência a penetração e de produtividade.

Para a coleta dos dados de resistência à penetração, o grid amostral foi de 0,25 ha, totalizando 194 pontos, posteriormente para sua avaliação o grid utilizado foi da malha

amostral original. Na coleta dos dados, ao chegar ao ponto definido, eram realizadas sondagens no ponto amostral, e mais duas amostragens em uma mesma direção, distantes entre si, na proporção $\frac{1}{2}$ do erro amostral do GPS. Assim, com um erro direcional de quatro metros, os pontos eram coletados a cada dois metros de distância.

4.2 Análise dos atributos químicos e correção a taxa variável

A amostragem de solo foi realizada em 2008 e a reamostragem em 2010, utilizando uma malha amostral quadricular regular de 100 x 100 m, totalizando 41 pontos amostrais. As profundidades de coleta foram de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, utilizando como instrumento amostrador a pá de corte (COMISSÃO..., 2004). Em cada ponto georreferenciado, para compor a amostra composta, foram coletadas 15 subamostras, num raio de 10 m, de acordo com as recomendações de amostragem para AP do comitê Técnico do APcoop.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Solos da Cooperativa Central Gaúcha Ltda., sendo realizada análise completa (análise básica + micronutrientes) das amostras, para ambas as profundidades. Na reamostragem, realizada em novembro de 2010, foram determinados os mesmos parâmetros químicos propostos para análise dos teores iniciais.

O manejo da fertilidade, envolvendo a correção da acidez e a adubação das culturas, foi realizado com base na interpretação dos teores iniciais. Para os nutrientes P e K, foram realizadas duas estratégias para correção da fertilidade do solo da área, envolvendo a adubação de correção e a adubação de manutenção, com base em teores mínimos alvo e nos valores exportados pelas culturas comerciais. As adubações de correção (calcário, superfosfato triplo e cloreto de potássio) foram realizadas à taxa variada em superfície, em julho de 2008. O processo de reamostragem ocorreu em novembro de 2010, sendo que a aplicação a taxa variável ocorreu no início de junho de 2011.

A correção da acidez do solo foi baseada na Tabela 01, sendo que na condição inicial, em 2008, a correção teve o objetivo de elevar o pH a 5,5. A interpretação dos teores de acidez do solo leva em conta o índice SMP, como descrito no Manual de Adubação e Calagem dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (COMISSÃO..., 2004).

Tabela 1 – Recomendação de calagem a partir do índice SMP.

Índice SMP	pH em água desejado			Índice SMP	pH em água desejado		
	5,5	5,75 t/há	6		5,5	5,75 t/há	6
4,4	15	18	21	5,7	2,8	3,8	4,8
4,5	12,5	14,9	17,3	5,8	2,3	3,3	4,2
4,6	10,9	13	15,1	5,9	2,0	2,9	3,7
4,7	9,6	11,5	13,3	6,0	1,6	2,4	3,2
4,8	8,5	10,2	11,9	6,1	1,3	2,0	2,7
4,9	7,7	9,2	10,7	6,2	1,0	1,6	2,2
5,0	6,6	8,3	9,9	6,3	0,8	1,3	1,8
5,1	6,0	7,6	9,1	6,4	0,6	1,0	1,4
5,2	5,3	6,8	8,3	6,5	0,4	0,8	1,1
5,3	4,8	6,2	7,5	6,6	0,2	0,5	0,8
5,4	4,2	5,5	6,8	6,7	0,0	0,3	0,5
5,5	3,7	4,9	6,1	6,8	0,0	0,2	0,3
5,6	3,2	4,3	5,4	6,9	0,0	0,1	0,2

Fonte: Fiorin, 2012.

Os resultados das análises referentes aos atributos do solo relacionados à fertilidade do solo foram separados em classes para avaliação dos níveis de disponibilidade, calculando o respectivo percentual para cada classe através de uma distribuição de frequência. Os parâmetros utilizados na avaliação dos teores de argila, pH em água e saturação por bases são semelhantes aos adotado no Manual de Adubação de Calagem para os Estados do RS e SC (COMISSÃO..., 2004).

Para os teores de fósforo, potássio utilizou-se de uma proposta elaborada a partir dos dados adquiridos em Schlindwein (2003). Neste estudo foram utilizados experimentos conduzidos por diferentes instituições, em vários solos, com diferentes épocas de cultivo, tempo de condução, delineamento experimental e tratamentos. Nesses experimentos foi possível obter as amostras de solo dos tratamentos com doses crescentes de P e K, bem como da testemunha (sem fertilizante) e os respectivos rendimentos das culturas. Foram utilizados 35 experimentos, com doses de P (18) e K (17), principalmente na região do Planalto Riograndense, onde predominam os latossolos cultivados com soja, trigo e milho, permitindo re-calibrar os teores críticos de P e K do solo. Com base nos resultados relatados e discutidos em Schlindwein (2003), Fiorin et al. (2012) apresenta uma proposta de novas faixas de interpretação dos teores de P e K no solo (Tabela 2), que estão sendo usadas desde 2008 em lavouras manejadas em AP no sistema APcoop.

Tabela 2 – Proposta de faixas de interpretação dos teores de fósforo no solo conforme o teor de argila e de potássio no solo conforme a capacidade de troca de cátions (CTC), extraídos pela solução de Mehlich¹-I.

Faixas de Interpretação	Teor de Fósforo no Solo				Teor de Potássio no Solo			
	Classe de solo conforme o teor de argila ⁽¹⁾				CTC a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)			
	1	2	3	4	≤ 5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	> 15,0
	----- mg dm ⁻³ -----							
Muito Baixo	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 6,0	≤ 8,0	≤ 20	≤ 30	≤ 40	≤ 50
Baixo	3,1–6,0	4,1–8,0	6,1–12,0	8,1–16,0	21–40	31–60	41–80	51–100
Médio ⁽²⁾	6,1–9,0	8,1–12,0	12,1–18,0	16,1–24,0	41–60	61–90	81–120	101–150
Alto	9,1–18,0	12,1–24,0	18,1–36,0	24,1–48,0	61–120	91–180	121–240	151–300
Muito Alto	> 18,0	> 24,0	> 36,0	> 48,0	> 120	> 180	> 240	> 300

Fonte: Fiorin et al. (2012).

(1) Classe 1 ≥ 60 % argila; Classe 2 = 60 a 41%; Classe 3 = 40 a 21%; Classe 4 = ≤ 20 % de argila.

(2) O teor crítico é o limite superior da faixa “Médio”.

Observa-se também na proposta da nova tabela, alteração quanto às faixas de CTC para interpretação do K, visando uma menor amplitude em relação à atual recomendação, que variava de 5,1 a 15 passando a ser dividida e resultando em 4 faixas de CTC, além de aumentos em seus teores (Tabela 2). Desta forma, é possível separar melhor os solos e assim promover de maneira mais eficiente a interpretação e recomendação da adubação potássica, inclusive contemplando os conceitos de saturação da CTC por K.

Para a correção das condições iniciais de fertilidade, no ano de 2008 e na reamostragem em 2010 foi baseada em metas de fertilidade, para assim determinar a quantidade de corretivo e fertilizante necessário para aplicação em taxa variável, conforme ilustrado nas tabelas 03. Quando avaliadas as condições de pH, a aplicação do corretivo foi baseado na pretensão de elevar os níveis de pH a 5,5. Posteriormente, em reamostragem no ano de 2010, a aplicação de calcário foi baseada na meta de elevar o pH a 5,75.

A correção dos níveis de P e K foi baseada na Tabela 2, onde de acordo com a classe de solo, determina-se o teor de P no solo, bem como seu teor crítico. Já para a correção de K utiliza-se a faixa de CTC a pH 7,0 para determinar a faixa de interpretação do teor crítico do

elemento. A partir disso, é possível determinar uma meta a ser atingida do nutriente no solo, bem como a necessidade de fertilizante para elevar os níveis de nutriente no solo.

Desta forma, como ilustrado na Tabela 03, na condição inicial da área, estabeleceu-se a meta de atingir um teor de 13 mg dm⁻³ de P e 200 mg dm⁻³ de K no solo. No processo de reamostragem no ano de 2010, estabeleceu-se a meta de elevar para 18 mg dm⁻³ de P e para 204 mg dm⁻³ de K no solo. Na mesma tabela, foi montada uma programação para os próximos anos, baseados em reamostragens, com o objetivo de elevar os teores de pH a 6,0, de P para 20 mg dm⁻³ e 220 mg dm⁻³ de K no solo teores esses considerados ótimos para o desenvolvimento das principais culturas agrícolas. Também está programado o uso de gesso agrícola, para melhoria da qualidade da fertilidade ao longo do perfil do solo.

Tabela 3 – Correção dos teores de pH, fósforo e potássio, considerando a condições da área inicial, além de considerar as perspectivas futuras de condução da fertilidade da área.

Etapas	Ano da correção	Calcário	Meta pH em água	Super Triplo	Meta P	Cloreto de Potássio	Meta K
1ª amostragem	2008	73 ton	5,50	7,50 ton	13 mg dm ⁻³	0,85 ton	200 mg dm ⁻³
Reamostragem	2011	124 ton	5,75	2,90 ton	18 mg dm ⁻³	0,68 ton	204 mg dm ⁻³
Reamostragem	2014	?	6,00	?	18 mg dm ⁻³	?	204 mg dm ⁻³
Reamostragem	2017	Gesso	6,00	?	20 mg dm ⁻³	?	220 mg dm ⁻³

Para aplicação do calcário para a correção da acidez e dos fertilizantes superfosfato triplo e cloreto de potássio para a correção de P e K respectivamente, foi operacionalizada pelo distribuidor a taxa variável Hércules 24000 C da Stara como ilustrado na figura 03. Os mapas de aplicação com as doses para correção estão disponíveis para visualização no apêndice.



Figura 3 – Equipamento utilizado para a aplicação à taxa variada dos corretivos e fertilizantes.

4.3 Determinação dos dados de resistência à penetração

A primeira amostragem dos níveis de resistência a penetração ocorreu no ano de 2008, onde foi utilizado o equipamento PenetroLOG PLG 1020, um medidor eletrônico de compactação do solo da empresa Falker. O equipamento segue as recomendações da norma internacional ASAE S. 313.3, que especifica as regras e procedimentos para a medição da compactação do solo. É composto de um módulo eletrônico acoplado a uma haste dividida em duas partes, com um cone na ponta inferior.

O PenetroLOG, permite a detecção de áreas de solo compactado através da medição eletrônica da força de RP, juntamente com a medição da profundidade. Os dados obtidos com o equipamento foram transferidos para o computador, para análise e interpretação dos dados, bem como a geração dos mapas com o auxílio do software CR Campeiro.

No ano de 2012 foram realizadas novas determinações dos níveis de RP, com a utilização de outro equipamento cedido pela empresa Falker. O modelo utilizado foi o SoloStar PG 5500, constituindo um sistema automatizado para medição de compactação. Conforme ilustrado na figura 4, o sistema SoloStar permite a realização de medições de compactação em grandes áreas, de forma rápida e precisa, possibilitando sua utilização nos sistemas de AP.

O equipamento permite a detecção de áreas de solo compactado através da medição eletrônica da RP (Índice de Cone) juntamente com a medição de profundidade. Um receptor GPS foi conectado ao equipamento para o registro da localização geográfica de cada medição,

após os dados foram transferidos para o computador para serem analisado com o auxílio do software CR Campeiro.



Figura 4 – Procedimentos realizados para a coleta de informações de resistência à penetração a partir do penetrômetro SoloStar da empresa Falker.

4.4 Obtenção dos mapas de produtividade

A avaliação dos dados de produtividade foi obtida com a cultura do milho. O híbrido utilizado para a formação da lavoura foi o AG 9020 PRO, sendo a semeadura realizada entre os dias 06 a 09 de agosto de 2012 e a colheita entre os dias 01 a 05 de janeiro de 2013. Na adubação de base utilizou-se 400 Kg ha⁻¹ do fertilizante NPK (10.20.10), já em cobertura foi usado o fertilizante Sulfammo (26.00.00).

Para a coleta dos dados de produtividade, o produtor envolvido na pesquisa disponibilizou de colhedora equipada com monitor de colheita marca Stara Modelo Topper 4500, adaptado a uma colhedora marca New Holland Modelo NH8055. O monitor de colheita Topper 4500 possui plataforma operacional Windows CE, com memória interna de 700 horas de trabalho. O monitor de colheita compõe-se de sistema DGPS, para localização em tempo real, sensor de umidade, sensor de rendimento e sensor de plataforma, com o objetivo de identificar e mapear em tempo real a produtividade obtida. O sensor de produtividade é instalado no elevador de grãos limpos. Conjuntamente, o sensor de umidade é montado junto ao helicóide do graneleiro, medindo em tempo real a umidade dos grãos, possibilitando a determinação da produtividade corrigindo a umidade de armazenagem.

Para a elaboração do mapa de produtividade utilizou-se a malha amostral original e o programa CR Campeiro para a interpolação dos dados e geração do mapa. Sendo realizado primeiramente o processo de filtragem de erros, eliminando os valores de produtividade discrepantes, com erros de posicionamento (coordenadas repetidas) e a presença de valores de produtividade improvável devido ao seu alto valor, quando comparado com os pontos sequenciais. Desta forma, informações detalhadas da produtividade do talhão podem ser diagnosticadas, com possível correção das causas de baixas produtividades em algumas áreas do talhão e/ou permitirem o estudo dos parâmetros relacionados com a produtividade e suas limitações.

4.5 Definição de zonas de manejo

Para a interpretação das zonas de manejo, primeiramente foi realizada a determinação das zonas de RP e de produtividade. Posteriormente foram realizadas análises para avaliar a

distribuição da RP ao longo do perfil do solo e correlação entre a RP e a produtividade, como descritas a seguir.

Para a determinação das zonas de produtividade foi usado como parâmetro uma diferença de 10 % (tanto para menos, como para mais) do rendimento médio geral (6.645 Kg ha⁻¹) da área de milho. Assim, as zonas foram distribuídas da seguinte forma: baixa (< 6.000 Kg ha⁻¹); média (6.000 – 7.000 Kg ha⁻¹) e alta (> 7.000 kg ha⁻¹). Já para a determinação das zonas de RP foi considerado os seguintes índices de RP: < 2,0 MPa (baixa); > 2,0-2,7 MPa (média) e >2,7 MPa (alta).

Na caracterização da distribuição da RP ao longo do perfil do solo nas diferentes zonas de produtividade, foram utilizados três pontos amostrais e feito a média da RP em cada zona de produtividade de forma aleatória. Já, para a determinação da correlação entre os dados de RP e rendimento da cultura utilizou-se dados de três pontos amostrais em cada zona de produtividade de forma aleatória. Os dados foram submetidos à análise estatística com auxílio do programa computacional Excel, para a correlação entre os pontos avaliados.

Após a determinação dos dados citados acima se foi a campo para verificar a situação do sistema radicular em cada zona de rendimento através de uma análise visual, através da coleta de plantas em cada zona, onde as mesmas foram fotografadas para demonstrar o crescimento das raízes no perfil de solo.

A determinação das zonas de manejo foi baseada nos resultados obtidos nas avaliações de RP da profundidade de 0,07-0,14 m e dados de produtividade, já que a área possui características em relação aos atributos químicos da fertilidade já corrigidas a taxa variável. A caracterização teve auxílio do software CR Campeiro, responsável pelo processo de interpolação e obtenção das zonas de manejo, através da sobreposição dos mapas de RP e de produtividade, bem como a comparação com mapa de altitude.

4.6 Tratamento dos dados

Para o tratamento dos dados obtidos, foi utilizado o Programa CR Campeiro, desenvolvido pelo Setor de Geomática da Universidade Federal de Santa Maria (Giotto et al., 2004) para a geração de mapas de compactação, de produtividade e na sobreposição dos dados dos mapas de produtividade e de RP para a definição de zonas de manejo. O programa também serviu para o gerenciamento das características químicas do solo, tanto para a

geração dos dados de fertilidade, como para a confecção dos mapas de correção e arquivos de aplicação a taxa variável.

Os dados de P e K obtidos nas duas profundidades foram submetidos à análise estatística descritiva, objetivando verificar a posição e dispersão dos dados, procedida com o auxílio do programa computacional Statistical Analysis System (SAS). Os parâmetros estatísticos determinados foram: mínimo, média, mediana, máximo, desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria (Cs) e curtose (Ck). A dispersão dos dados foi classificada com base nos valores de CV%, sendo distribuída em baixa ($CV < 12\%$), média ($12 \leq CV \leq 62\%$) e alta ($CV > 62\%$) (WARRICK & NIELSEN, 1980). Além disso, verificou-se a existência de tendência central (normalidade) dos dados originais por meio do Teste W ($p < 0,05$) (SHAPIRO & WILK, 1965).

A interpretação e distribuição dos teores de P e K, em classes de interpretação, foram realizadas de acordo com a proposta do Comitê Técnico do APcoop. Posteriormente, utilizando técnicas geoestatísticas, procedeu-se à interpolação por krigagem¹ e a espacialização dos valores na área através de mapas temáticos, com auxílio do programa computacional CR Campeiro.

¹ A Krigagem é considerada uma metodologia de interpolação de dados. Ela utiliza o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações. Utilizando o princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, que diz que unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais afastadas, este método utiliza funções matemáticas para acrescentar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, e criar assim os novos pontos interpolados com base nessas combinações lineares de dados (GIOTTO et al., 2004).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da intervenção dos atributos químicos do solo

Com base nas análises realizadas no ano de 2008, as condições de pH eram bastante variáveis, mais visivelmente na camada de 0-0,10 m, sendo esta a mais explorada pelo sistema radicular das plantas. Em reanálise pode-se verificar a melhoria nas condições de pH do solo, principalmente na camada de 0-0,10 m, já que o corretivo foi aplicado a lanço, tendo seu efeito mais significativo nesta camada. Observando as figuras 05 e 06, é possível verificar a eliminação das zonas mais ácidas nesta camada, promovendo melhorias nas condições químicas do solo.

Já analisando os valores de pH na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, não foram obtidos resultados positivos na correção da acidez do solo. Este fato pode ser atribuído ao modo de aplicação do corretivo, que foi a lanço. Sabe-se que a descida do corretivo é lenta e gradual, sendo influenciada por vários fatores, como os físicos de solo, pluviosidade e pelo sistema plantio direto na palha, concentrando MO na superfície do solo.

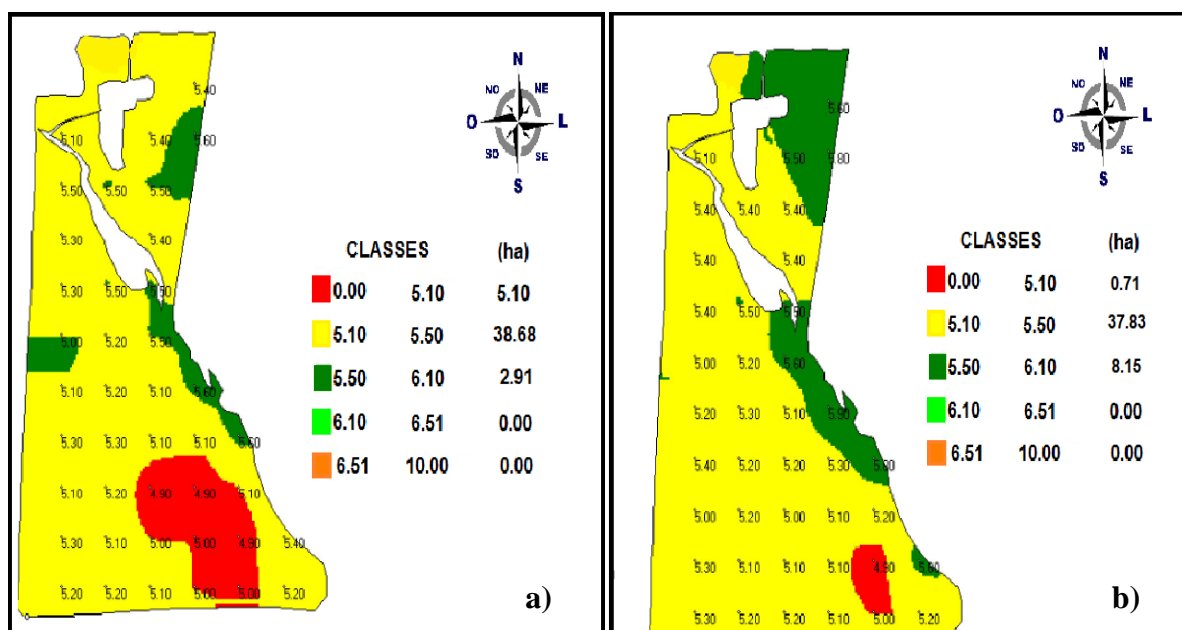


Figura 5 – Valores de pH na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e valores de pH na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.

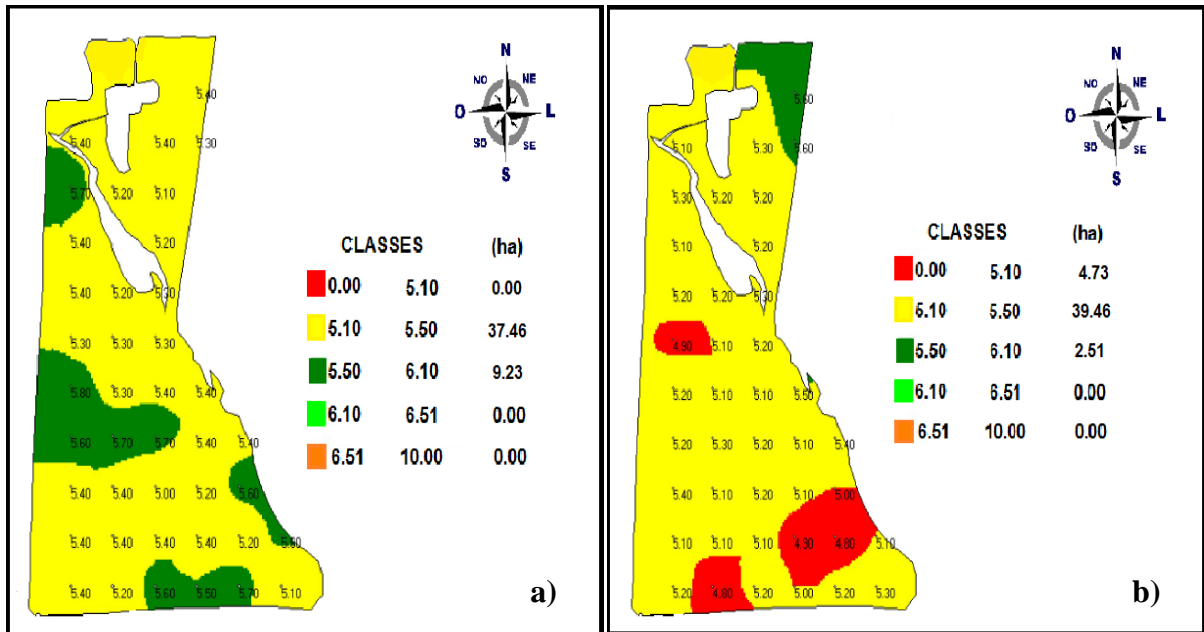


Figura 6 – Valores de pH em reamostragem na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e valores de pH, em reamostragem na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.

Em relação à avaliação dos teores de P, as condições do nutriente na amostragem realizada em 2008, podem ser consideradas críticas para o desenvolvimento das principais culturas agrícolas, principalmente na camada de 0,10-0,20 m. O P é o elemento de maior complexidade no solo, sendo influenciado por diversos fatores, tanto pH, teores de outros nutrientes. Conforme a figura 07, os teores de fósforo diminuem com a profundidade, estando diretamente relacionado com o pH do solo e sua baixa mobilidade. Assim, condições de acidez do solo, diminuem a disponibilidade de fósforo ao solo, sendo o contrário válido.

Em amostragem no ano de 2008, os teores de P na camada superficial (0 a 0,10 m) apresentaram ampla distribuição nas faixas interpretativas, com predominância das faixas de interpretação baixo (48,78%) e médio (41,46%). Adicional a isso, o somatório das faixas muito baixo e baixo equivalem a mais da metade da área (53,66%). Na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), aproximadamente 97% da área encontra-se com teores baixos e muito baixos. Dessa forma, em ambas as profundidades, a faixa muito baixo e baixo constituem um percentual significativo da área que necessitam atenção especial e a utilização de doses maiores para elevar os teores de P no solo.

Essa elevada variabilidade espacial dos teores de P observada na área estudada, demonstra a ineficiência das recomendações de fertilizantes, quando manejada tradicionalmente, pela chamada “agricultura pela média”. No uso de valores médios, percebe-

se que em alguns locais, a dose recomendada seria subdimensionada e em outros, haveria aplicação em excesso do fertilizante. No processo de reamostragem em 2010, pode-se observar incremento nos teores de P conforme ilustrado na figura 08, principalmente na camada superficial (0 a 0,10 m), onde 80,48% da área teve enquadramento na faixa de interpretação alto, considerada de fertilidade adequada para o desenvolvimento das plantas. No entanto, verificou-se incremento, inclusive, para a camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), onde grande parte da área passou da faixa muito baixo para as faixas baixo (56,10%), médio (29,29%) e alto (9,76%).

Portanto, no processo de reamostragem, obtiveram-se melhorias significativas nos teores de P no solo, em ambas as camadas amostradas. Além disso, a elevação dos níveis de P possibilitou o acréscimo no volume de raízes, aumentando seu potencial produtivo. Levando em consideração os resultados obtidos, é possível afirmar que a área teve seus teores de fósforo corrigidos eficientemente, não sendo um fator limitante para a produção.

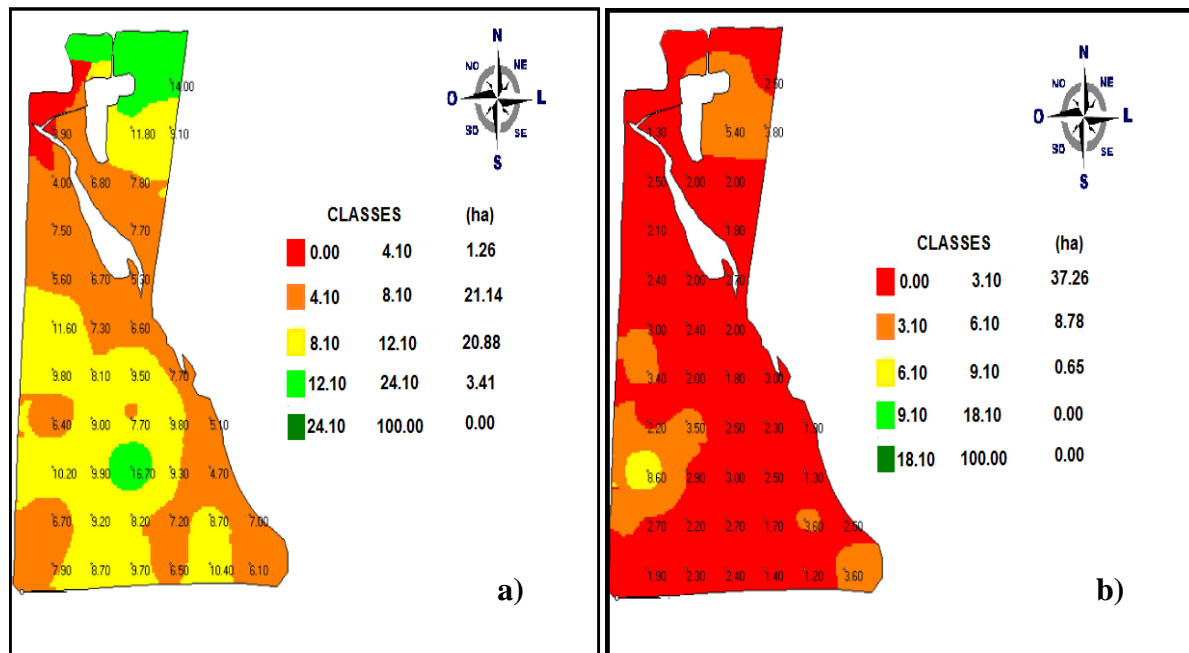


Figura 7 – Mapa dos teores de fósforo na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e Mapa dos teores de fósforo na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.

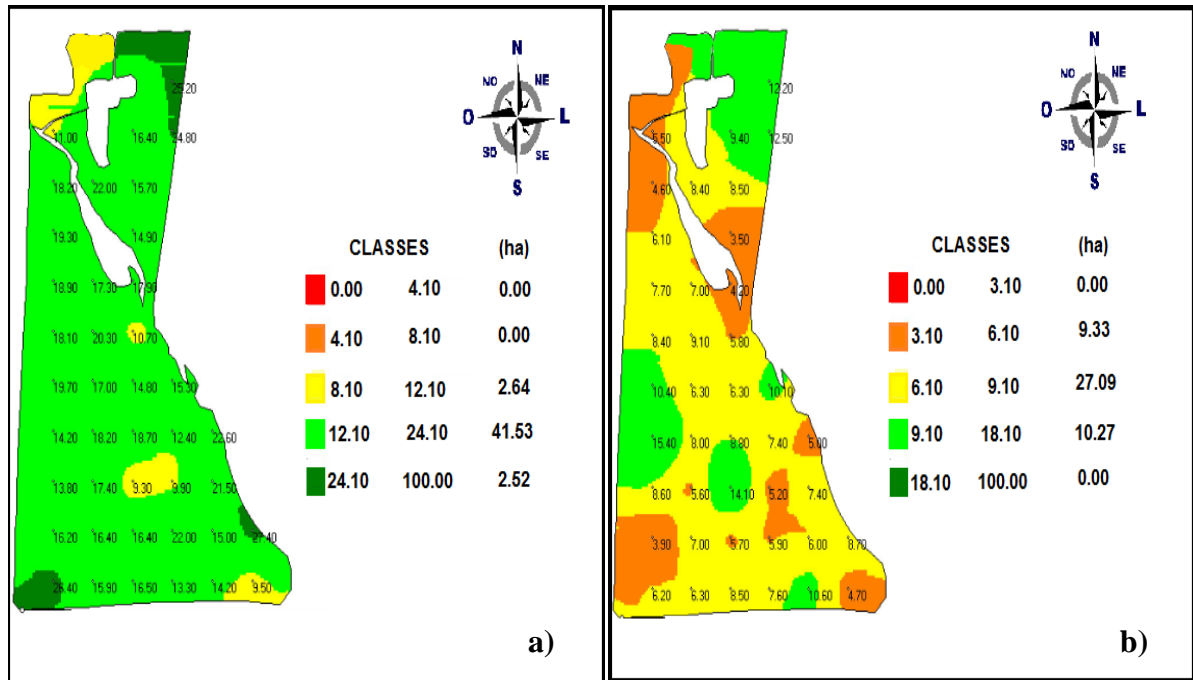


Figura 8 – Mapa de reamostragem dos teores de fósforo na profundidade de 0-0,10 m (a) do ano de 2010 e Mapa de reamostragem dos teores de fósforo na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.

Em análise aos teores de K, é possível afirmar que seus teores mesmo antes da correção eram considerados satisfatórios para a produção agrícola, principalmente quando analisada a camada de 0-0,10 m, como pode ser observado na Figura 09. Não obstante, na camada de 0,10-0,20 m, a variabilidade dos teores de K oscilou pouco, porém maior em relação ao observado na camada de 0-0,10 m.

Em relação aos teores de K, observou-se que na condição inicial, expressa através da amostragem em 2008, os teores na camada superficial (0 a 0,10 m) apresentaram valores elevados, sendo que 100,0% da área enquadrou-se na faixa de interpretação alto e muito alto, para as quais se sugere somente a adubação de manutenção e/ou reposição. Na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m) percebe-se maior variação dos teores, com predominância na faixa de interpretação médio (60,98%), porém sem apresentar teores nas faixas extremas (muito baixo e muito alto). Assim, comparando as duas camadas, observa-se um gradiente considerável na distribuição vertical de K no solo.

Na reamostragem da área, após a adubação, foram obtidos ganhos significativos com a diminuição da variabilidade, principalmente na camada inferior, em que os níveis do nutriente eram menores e mais variáveis. O K é um elemento bastante móvel no solo, fato atribuído à

sua facilidade de correção, mesmo aplicado a lanço, conforme realizado no trabalho. Assim, após reamostragem, pode-se afirmar que os teores de K não são limitantes a produção.

Como ilustrado na figura 10, na camada superficial (0 a 0,10 m), notou-se aumento nos teores de K na faixa de interpretação muito alto, permanecendo a predominância de valores classificados como alto em mais da metade da área. Para a camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), os teores de K interpretados na faixa alto apresentaram importante elevação, demonstrando melhoria da fertilidade em profundidade. Embora se observe menores teores de K na camada subsuperficial e, portanto, um gradiente de fertilidade em profundidade.

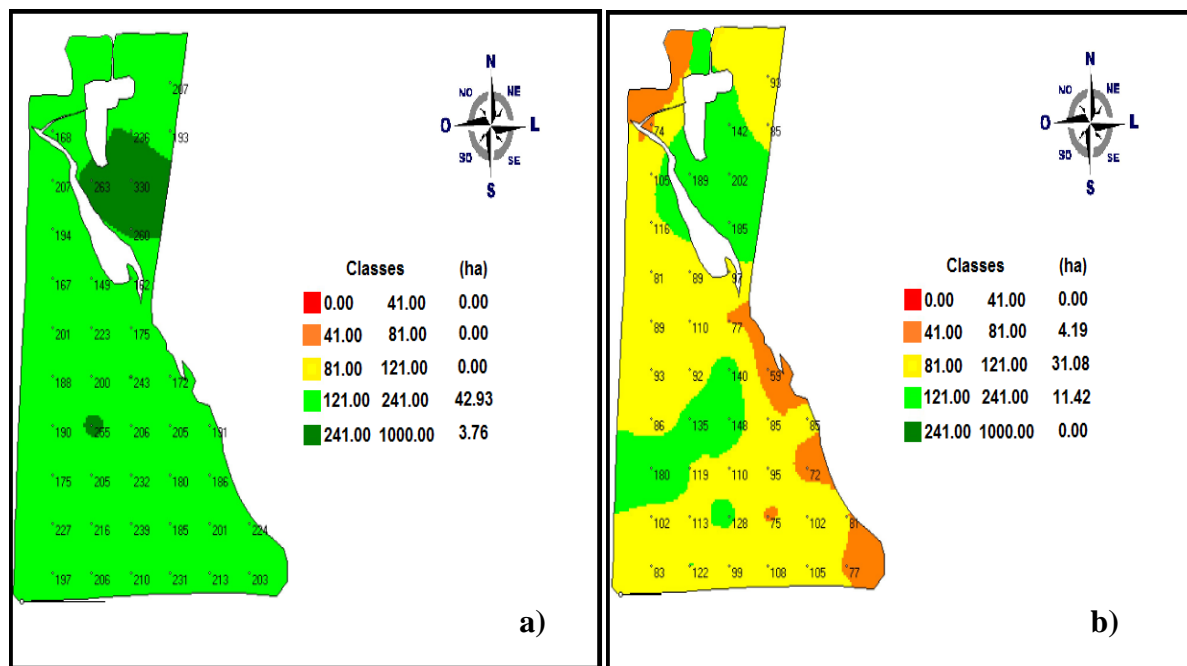


Figura 9 – Mapas dos teores de potássio na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2008 e Mapas dos teores de potássio na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008.

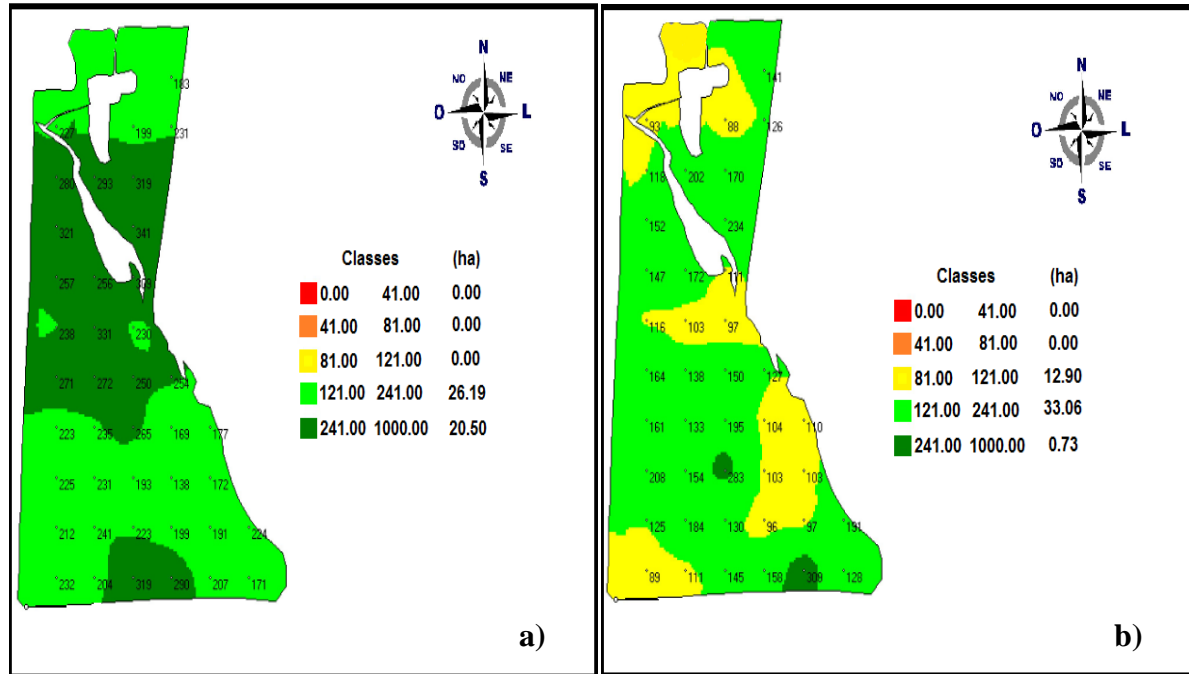


Figura 10 – Mapas de reamostragem dos teores de potássio na profundidade de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e Mapas de reamostragem dos teores de potássio na profundidade de 0,10-0,20 m (b) no de 2010.

Analisando os resultados obtidos na análise estatística descritiva dos teores de P e K (Tabela 4) verificou-se que as medidas de posição média e mediana foram próximas para o P e K em ambas as amostragens e profundidades estudadas. No entanto, os resultados demonstram que a distribuição de frequência não foi normal para os teores de P e K obtidos na amostragem e na camada 0,10 a 0,20 m da reamostragem.

Tabela 4 – Análise estatística descritiva dos teores de fósforo e potássio no solo coletados nos anos de 2008 e 2010, nas profundidades 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. São Luiz Gonzaga - RS, 2012.

Parâmetros Estatísticos	Amostragem (2008)		Reamostragem (2010)	
	0 - 0,10 m	0,10 - 0,20m	0 - 0,10 m	0,10 - 0,20 m
----- Fósforo (mg dm ⁻³) -----				
Número de Observações	41	41	41	41
Mínimo	3,9	1,2	9,3	3,5
Média	8,2	2,6	17,2	7,6
Mediana	7,8	2,4	16,5	7,4
Máximo	16,7	8,6	27,4	15,4
Desvio Padrão	2,51	1,24	4,43	2,67
Coefficiente de Variação (CV%)	30,69	47,66	25,75	35,09
Assimetria	1,05	3,12	0,36	1,00
Curtose	2,45	13,36	0,01	1,05
Teste W ¹	0,94*	0,71*	0,97 ^{ns}	0,93*
----- Potássio (mg dm ⁻³) -----				
Número de Observações	41	41	41	41
Mínimo	149,0	59,0	138,0	88,0
Média	207,7	108,0	239,1	145,5
Mediana	205,0	99,0	231,0	133,0
Máximo	330,0	202,0	341,0	309,0
Desvio Padrão	33,07	33,82	49,34	49,87
Coefficiente de Variação (CV%)	15,92	31,31	20,64	34,27
Assimetria	1,29	1,31	0,29	1,49
Curtose	3,48	1,29	0,47	2,57
Teste W ¹	0,92*	0,87*	0,97 ^{ns}	0,87*

Quanto à dispersão dos dados, analisada pelos valores do CV%, observou-se que os valores de P e K, nas duas épocas amostradas em ambas as profundidades, encontraram-se no intervalo entre 12 e 60% respectivamente e, portanto, foram classificados como de média variação. Avaliando comparativamente os processos de amostragem e reamostragem, a dispersão relativa dos teores de P no solo, nas duas profundidades, foi diminuída. Portanto, a área experimental que apresentava amplitude considerável para os teores de P, com a intervenção realizada através do manejo à taxa variada para adubação de correção, possibilitou decréscimo nos valores de CV%, tornando a área mais homogênea.

Na condição inicial, expressa através da amostragem em 2008, os teores de P no solo foram observados na camada superficial (0 a 0,10 m), com teores variando de 3,9 a 16,7 mg dm⁻³. Já na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), os teores foram menores, variando de 1,2 a

8,6 mg dm⁻³. No processo de reamostragem, conforme figura 09, observou-se que os teores de P da camada superficial variaram de 9,3 a 27,4 mg dm⁻³. Desta forma, nota-se que a média dos teores de P, foi elevada de 8,2 mg dm⁻³ (condição inicial) para 17,2 mg dm⁻³ (reamostragem) elevando o teor médio de P em 32% acima da meta prevista (13 mg dm⁻³), estando coerente com as doses utilizadas na adubação de manutenção, as quais foram 20 a 30% acima da exportação das culturas. Para a camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), observou-se incremento nos níveis de fertilidade para o P, variando de 3,5 a 15,4 mg dm⁻³. Neste caso, os teores médios de P foram elevados de 2,61 mg dm⁻³ (condição inicial) para 7,62 mg dm⁻³ (reamostragem). Observa-se, desta maneira, que a intervenção realizada à taxa variada, com o objetivo de corrigir os teores de P, mostrou-se prática eficiente para alcançar níveis adequados de fertilidade tanto em superfície como em subsuperfície.

Com relação ao K, o CV% apresentou valores relativamente mais baixos, quando comparado aos observados para o P. A menor dispersão dos teores de K, observados na camada superficial do solo, comprova que o manejo dos cultivos que vem sendo empregado na área é eficiente na diminuição da variabilidade. Porém, na camada subsuperficial, os valores de CV% foram mais altos, constatando que havia alta heterogeneidade natural na área, apresentando variabilidade vertical no perfil do solo.

Na condição inicial os teores variaram de 149 a 330 mg dm⁻³ na camada superficial (0 a 0,10 m) e de 59 a 202 mg dm⁻³ na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m). Com a reamostragem, observou-se que houve incremento nos teores de K, em ambas as profundidades, variando de 138 a 341 mg dm⁻³ na camada superficial e de 88 a 309 mg dm⁻³ na camada subsuperficial. Neste sentido, percebe-se que a realização das intervenções de correção à taxa variada mostraram-se eficientes, elevando os teores médios de K, em 15% na camada superficial e 35% na camada subsuperficial.

Visando verificar a distribuição dos teores de P e K em faixas de interpretação, realizadas conforme proposta do Comitê Técnico do Projeto APcoop, inicialmente foi feita a avaliação dos teores de argila e CTC pH 7,0 da área, utilizados na definição dos parâmetros interpretativos de P e K, respectivamente. Nesse sentido, os teores de argila apresentaram ampla variabilidade espacial (dados não apresentados), com predominância (63,41%) da área na Classe 2 (41 – 60% de argila) e os restantes (36,59%) da área na Classe 1 (> 60% de argila).

As mudanças ocorridas com a implantação do sistema direto na palha, bem como o uso de cultivares mais produtivas, que conseqüentemente extraem mais nutrientes do solo fizeram com que a recomendação de adubação seja diferenciada do que vinha sendo utilizado.

Fiorin et al. (2012), salientam que a adoção do SPD modificou a dinâmica dos nutrientes no solo causando mudanças na fertilidade em relação ao SPC. Schindwein (2003) apud Fiorin et al. (2012), critica os teores críticos e as faixas de fertilidade de P e K da atual recomendação estão subestimados, tanto para as amostras na camada de 0 a 0,20 m, como na de 0 a 0,10 m de profundidade. Em seus estudos sugere doses maiores do que as doses recomendadas pela Comissão... (2004) e estas, podem aumentar mais rapidamente os teores de P e de K do solo e o rendimento das culturas. Seus estudos indicam a necessidade de teores críticos de P e de K maiores no sistema plantio direto do que os sugeridos pela Comissão... (2004).

Considerando as condições iniciais da área, a correção dos teores de pH, P e K foi eficiente, tanto por diminuir a variabilidade espacial do atributos, tanto como melhorar os teores no solo, acima do considerado crítico, promovendo o desenvolvimento satisfatório das culturas. Para os próximos anos, com a melhoria das condições físico-químicas do solo, busca-se utilizar um condicionador de solo, como o gesso, com o intuito de elevar os teores de enxofre no solo, e também neutralizar alumínio em profundidade, propiciando um ambiente favorável ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

5.2 Análise dos atributos físicos e de produtividade para definição de zonas diferenciadas de manejo

Com base nos dados de resistência obtidos nas avaliações, é possível afirmar que os atributos físicos do solo, interferem diretamente na produtividade das culturas, sendo um fator limitante, mesmo que outros atributos, tanto químicos, como biológicos estejam adequados. A RP é influenciada por alguns fatores como: umidade do solo, textura e estrutura do solo. Solos de textura argilosa tendem a ser mais densos e conseqüentemente apresentam maior RP, não sendo necessariamente compactados.

Para a determinação da compactação a partir de dados de RP, é necessária a determinação de níveis críticos, de acordo com a textura do solo. Conforme apresentado nas figuras 12 a 14, a RP aumenta gradativamente com a profundidade, podendo ser atribuído à sua textura e presença de MO. Analisando-se a variabilidade, é possível observar independente da camada, zonas mais adensadas, principalmente a partir de 0,075 m de profundidade, formando uma camada de limitação ao crescimento radicular.

Os dados de RP podem ser usados com o objetivo de determinar a necessidade de manejo físico do solo, seja pela escarificação, para eliminação da camada compactada, seja pelo uso de rotação de culturas, a fim de evitar possíveis problemas futuros de compactação. A utilização de espécies como o nabo forrageiro é mais uma ferramenta para prevenir possíveis danos à estrutura física do solo, sendo seu sistema radicular pivotante e alcançam grandes profundidades, promovendo a reciclagem de nutrientes e também rompem possíveis camadas compactadas.

Nas camadas mais profundas (>10 cm de profundidade), os dados obtidos mostram resultados preocupantes, com níveis acima do considerado crítico. Desse modo, é praticamente impossível promover o crescimento radicular em profundidade. Tal fato explica a suscetibilidade das plantas ao estresse hídrico, pois ao analisar a campo o sistema radicular, as mesmas apresentam volume reduzido em percepção visual com baixa capacidade de absorção de água e nutrientes.

Para comprovar a hipótese de que em áreas compactadas o crescimento radicular é limitado, foram tiradas algumas fotos na área com a cultura da soja, tanto em zonas onde a RP alcançou os níveis críticos, como nos locais onde os atributos não eram limitantes. Assim, pode-se observar que nas áreas com elevada RP, as raízes se concentram nos primeiros centímetros de solo, visto que a raiz pivotante não consegue se expandir na direção vertical ficando retorcida e na posição horizontal.



Figura 11 – Desenvolvimento radicular em áreas com alta resistência à penetração.

Como ilustrado na figura 11, à compactação dos solos se evidencia a campo, com o deficiente desenvolvimento radicular. Além disso, é possível observar um impedimento físico exercido sobre as raízes na profundidade acima de 0,07 m, pois quando é observado o sistema radicular na cultura, é possível identificar o retorcimento da raiz pivotante, assim como seu direcionamento na posição horizontal, onde as condições físicas do solo são favoráveis.

Sabe-se que o desenvolvimento radicular está limitado principalmente às condições físicas, químicas e hídricas do solo. Sendo satisfeitas as necessidades químicas e hídricas, as condições físicas podem exercer influência direta no desenvolvimento das culturas.

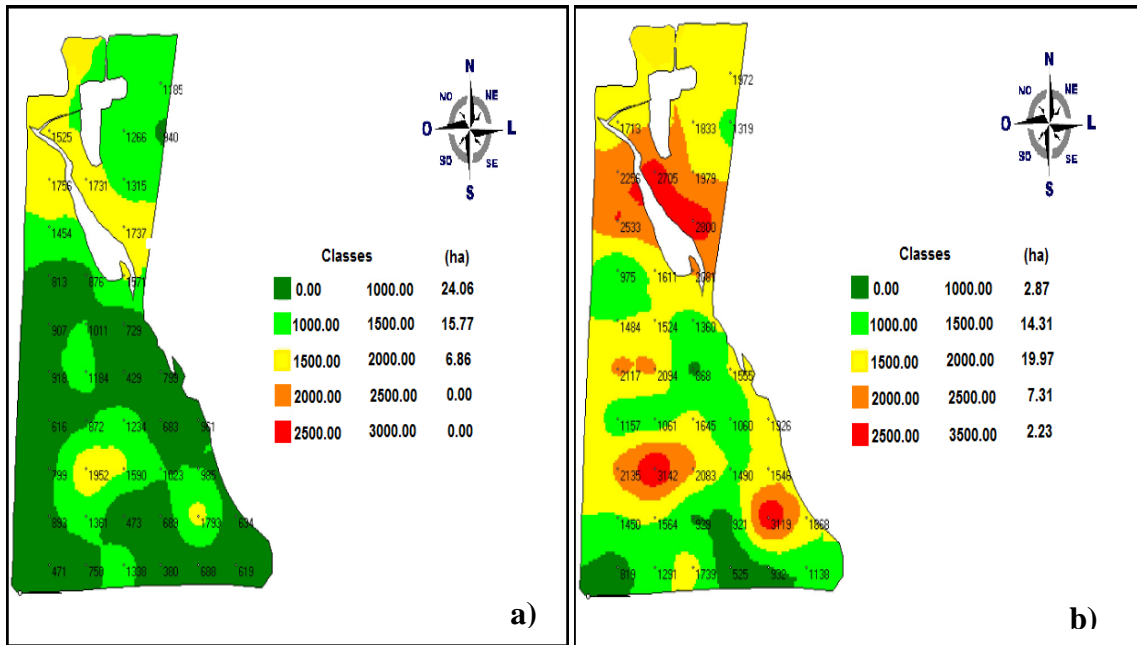


Figura 12 – Resistência à penetração na profundidade de 0-0,025 m (a) no ano de 2010 e Resistência à penetração na profundidade de 0,025-0,05 m (b) no ano de 2010.

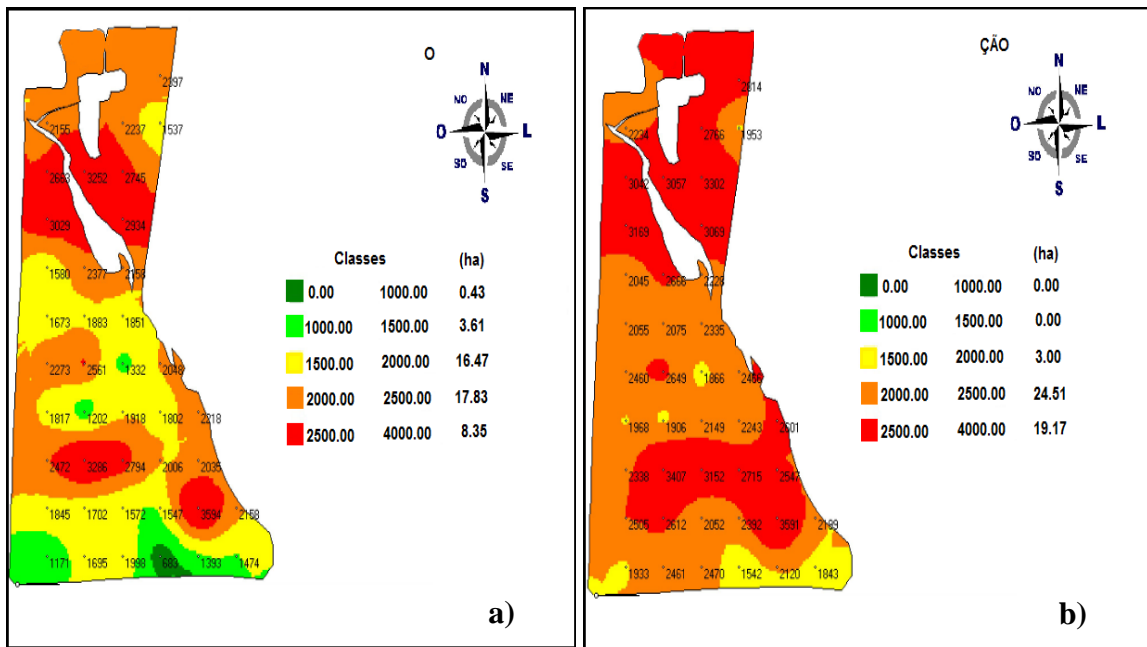


Figura 13 – Resistência à penetração na profundidade de 0,05-0,075 m (a) no ano de 2010 e Resistência à penetração na profundidade de 0,075-0,10 m (b) no ano de 2010.

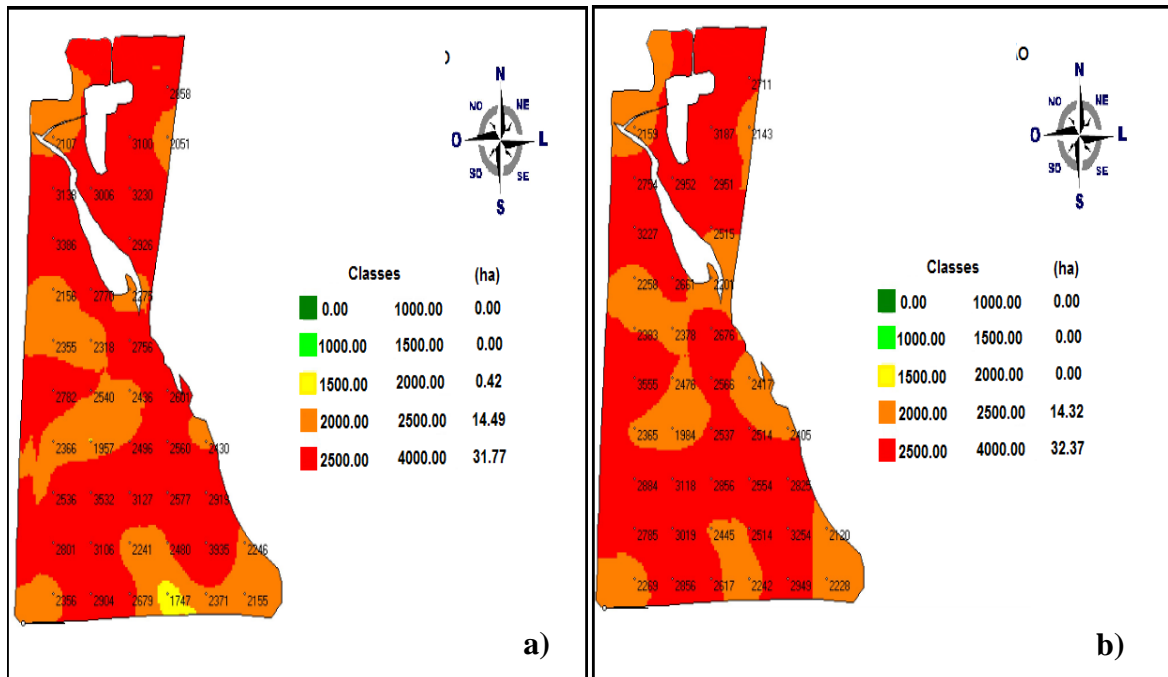


Figura 14 – Resistência à penetração na profundidade de 0,10-0,125 m (a) no ano de 2010 e Resistência à penetração na profundidade de 0,125-0,15 m (b) ano de 2010.

Em reamostragem no ano de 2012, os resultados obtidos correlacionam-se com os observados no ano de 2010, afirmando as condições físicas do solo através da RP. Na camada de 0,05-0,10 m de profundidade foram evidenciados valores de RP acima do nível crítico, podendo ser instituída uma camada compactada nessa profundidade como demonstrado na figura 15. Os maiores valores de RP são observados na área superior do mapa, mostrando a correlação existente entre os mapas de produtividade e os resultados de RP.

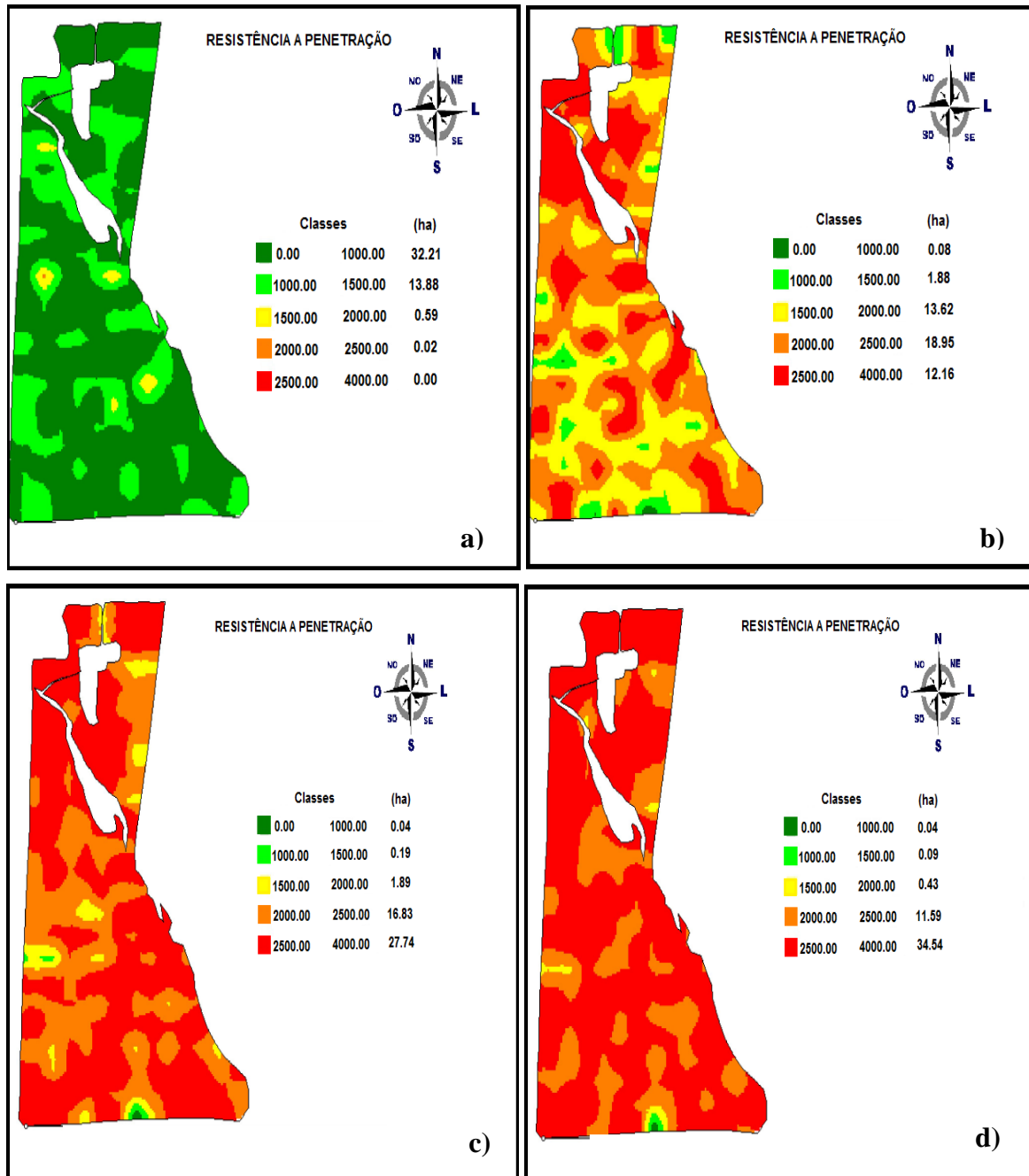


Figura 15 – Resistência à Penetração na profundidade de 0-0,05 m (a) no ano de 2012; Resistência à penetração na profundidade de 0,05-0,10 m (b) no ano de 2012; Resistência à penetração na profundidade de 0,10-0,15 m (c) no ano de 2012 e Resistência à penetração na profundidade de 0,15-0,20 m (d) no ano de 2012.

Conforme as informações coletadas de RP foram definidas três zonas de RP, sendo chamadas de alta, média e baixa. Para a determinação destas zonas foi considerado os seguintes índices de RP: < 2,0 MPa (baixa); > 2,0-2,7 MPa (média) e >2,7 MPa (alta). Nessas zonas, na cultura da soja, no ano de 2013, foram realizadas avaliações de desenvolvimento

radicular de forma visual, conforme ilustrado na figura 16, onde foi possível identificar interação direta entre os níveis de RP e o desenvolvimento radicular.

Ao analisar a Figura 16 (a), fica evidente a existência de uma camada compactada a partir de 0,07m de profundidade. O crescimento radicular se torna superficial, com a predominância de raízes secundárias. Além disso, a raiz pivotante não consegue romper esta camada, forçando seu crescimento vertical. A resistência do solo a penetração tem sido apontada como a principal restrição física ao crescimento radicular das plantas (KAISER et al., 2009 apud STRECK, 2003; COLLARES et al., 2006).

Esses fatores aliados implicam em sérios reflexos, tanto na deficiência de absorção de nutrientes em profundidade, bem como na absorção de água em profundidade. Assim, em situações de veranicos prolongados as plantas acabam sofrendo com o déficit hídrico, o que não ocorre com plantas com sistema radicular bem desenvolvido.

Ao observarmos o desenvolvimento radicular nas zonas de média, é possível observar certa melhoria, com raízes mais desenvolvidas e vigorosas. Porém, ao verificar várias plantas, algumas ainda demonstram deficiência no desenvolvimento radicular, ainda que, em menor intensidade. Outro fator ponderante para esses resultados é a utilização por vários anos do sistema de plantio direto, concentrando na superfície os nutrientes e MO, fazendo com que o sistema radicular se concentre nessa profundidade.

Analisando o desenvolvimento radicular nas zonas de baixa RP, pode-se observar a relação direta existente entre o desenvolvimento radicular e o potencial produtivo da cultura. Na avaliação visual, as plantas apresentaram-se mais vigorosas, com bom engalhamento e com excelente stand de plantas, sem falhas, ou plantas mal desenvolvidas. Nesse sentido Kaiser et al. (2009), ressalta que é fundamental para o crescimento da planta que o solo apresente condições favoráveis ao crescimento das raízes, o que permite explorar um maior volume de solo em profundidade, aumentando o acesso à água e reduzindo os riscos de deficiência hídrica.

Além disso, é possível observar o excelente desenvolvimento radicular, onde muitas plantas apresentavam mais de 12 cm de sistema radicular, apresentando ainda muitas raízes secundárias. Isso é explicado pelo fato da concentração de MO e nutriente na superfície do solo, proporcionado pelo sistema de plantio direto da palha. Porém, mesmo com a existência de muitas raízes secundárias a raiz pivotante se desenvolveu de maneira satisfatória, onde em momentos de déficit hídrico, ou outro fator limitante, a planta consegue suportar com maior facilidade os intempéries oferecidos pelo clima e pelo manejo.

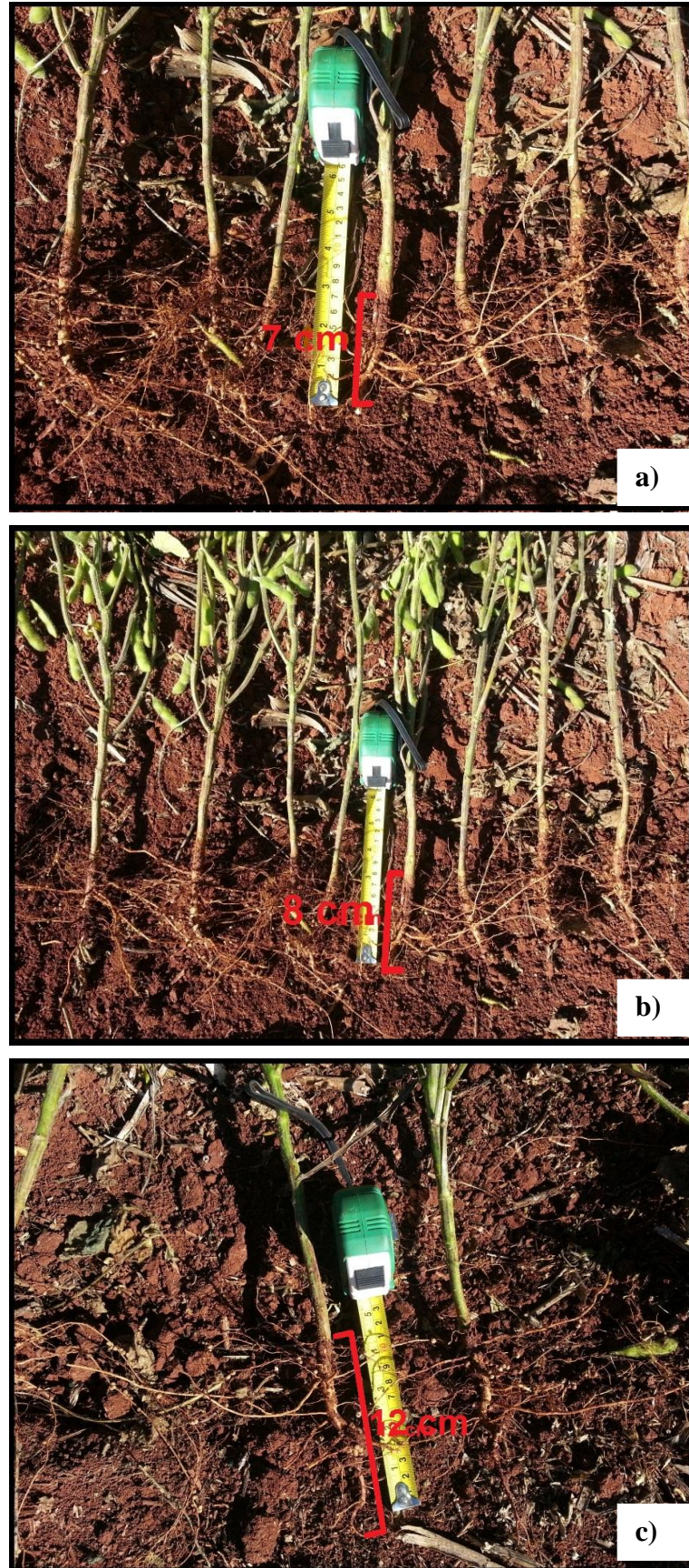


Figura 16 – Desenvolvimento radicular nas zonas de alta (a); média (b) e baixa (c) resistência a penetração.

Os dados de produtividade foram obtidos com a cultura do milho, existindo grande variabilidade na produtividade. Como os atributos químicos do solo já foram corrigidos, não se esperava grande variação da produção na área, sendo assim necessária a determinação da causa existente. Comparando os dados constantes no mapa de produtividade e nos mapas de RP é possível observar que há na mesma zona, coincidência de dados. Onde existe maior RP foram obtidos dados de menor produtividade. Assim, é possível definir uma zona de manejo diferenciada, com características distintas do restante da área.

Na figura 17 verificamos o mapa de produtividade obtido na colheita do milho safra 2012/2013, onde fica constatado que a variabilidade é bastante evidente, mesmo depois de a área ter sido corrigida pelo sistema de AP, tendo seus níveis de nutrientes niveladas a uma condição favorável para o desenvolvimento da cultura.

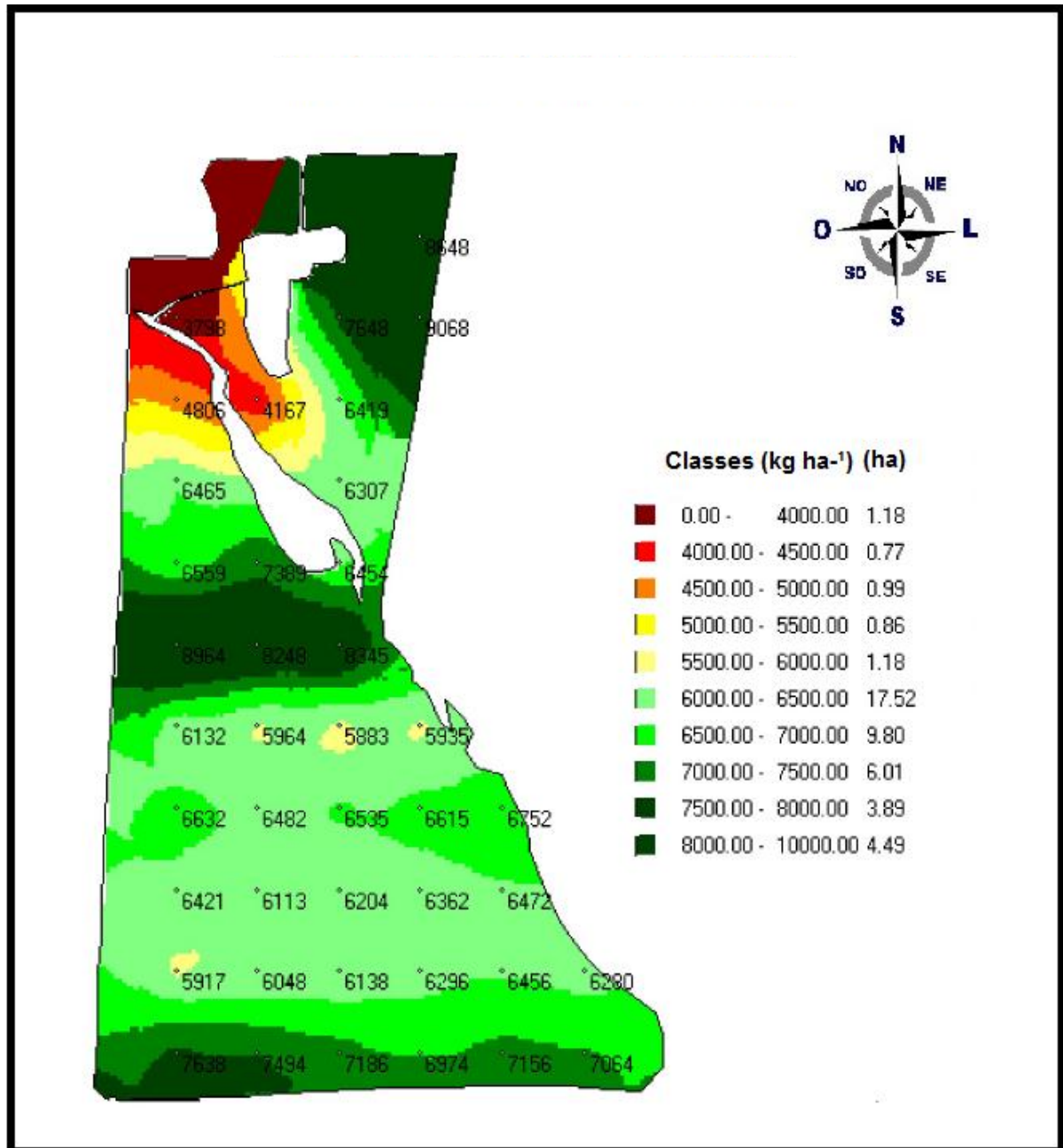


Figura 17 – Mapa de produtividade na cultura do milho obtido na safra 2012/13. Cores são valores interpolados e o número é a média de produtividade de cada ponto amostrado.

Como mostra o mapa de produtividade, em torno de 10% da área apresentou rendimento inferior a 6000 Kg ha⁻¹, 58,5% da área apresentou produção entre 6000 e 7000 Kg ha⁻¹, sendo que produtividades acima de 7000 Kg ha⁻¹ foram observados em pouco mais de 30% da área. A produtividade real obtida foi de 6645 Kg ha⁻¹, resultado da alta variabilidade nas diferentes zonas da lavoura, sendo que nas melhores condições foram obtidas produções de até 8900 Kg ha⁻¹.

Através dos dados coletados de produtividade da cultura do milho na safra 2012/2013, bem como dados de RP no ano de 2012, foi possível correlacionar esses dados, como mostra a figura 18. A produtividade da cultura está representada pelas diferentes cores no mapa e os dados de RP informados em valores médios de cada ponto amostral.

Com o intuito de melhorar o manejo da área podemos subdividi-las em três zonas: de baixa ($<6000 \text{ Kg há}^{-1}$), média (entre 6000 e 7000 Kg há^{-1}) e alta ($>7000 \text{ Kg há}^{-1}$) produtividade. Como demonstrado anteriormente nos mapas de RP, é possível evidenciar zonas diferenciadas, com baixa, média e alta RP. Ao sobrepor os mapas de produtividade aos de RP, observa-se interação direta nas zonas de produtividade e RP, sendo a possível causa da variabilidade na produção evidenciada na área.

Na comparação dos dados de produtividade e RP podemos observar uma influência direta entre esses parâmetros, confirmando assim, a influência da compactação na produtividade das culturas. Como mostra a figura 18, nos locais de baixo rendimento, onde a produtividade é menor de 6000 Kg ha^{-1} , a RP ultrapassa 2800 Kpa , sendo que valores maiores de 2000 Kpa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular.

Nos locais de alto rendimento de grãos, os valores de RP não ultrapassam 2000 Kpa . É este o limite máximo de RP que não limita o crescimento radicular das culturas. Considerando estes resultados é possível afirmar que em condições químicas e culturais semelhantes, a RP é limitante à produtividade das culturas, sendo assim, necessária uma intervenção para proporcionar condições adequadas de solo para favorecer o desenvolvimento satisfatório das culturas implantadas.

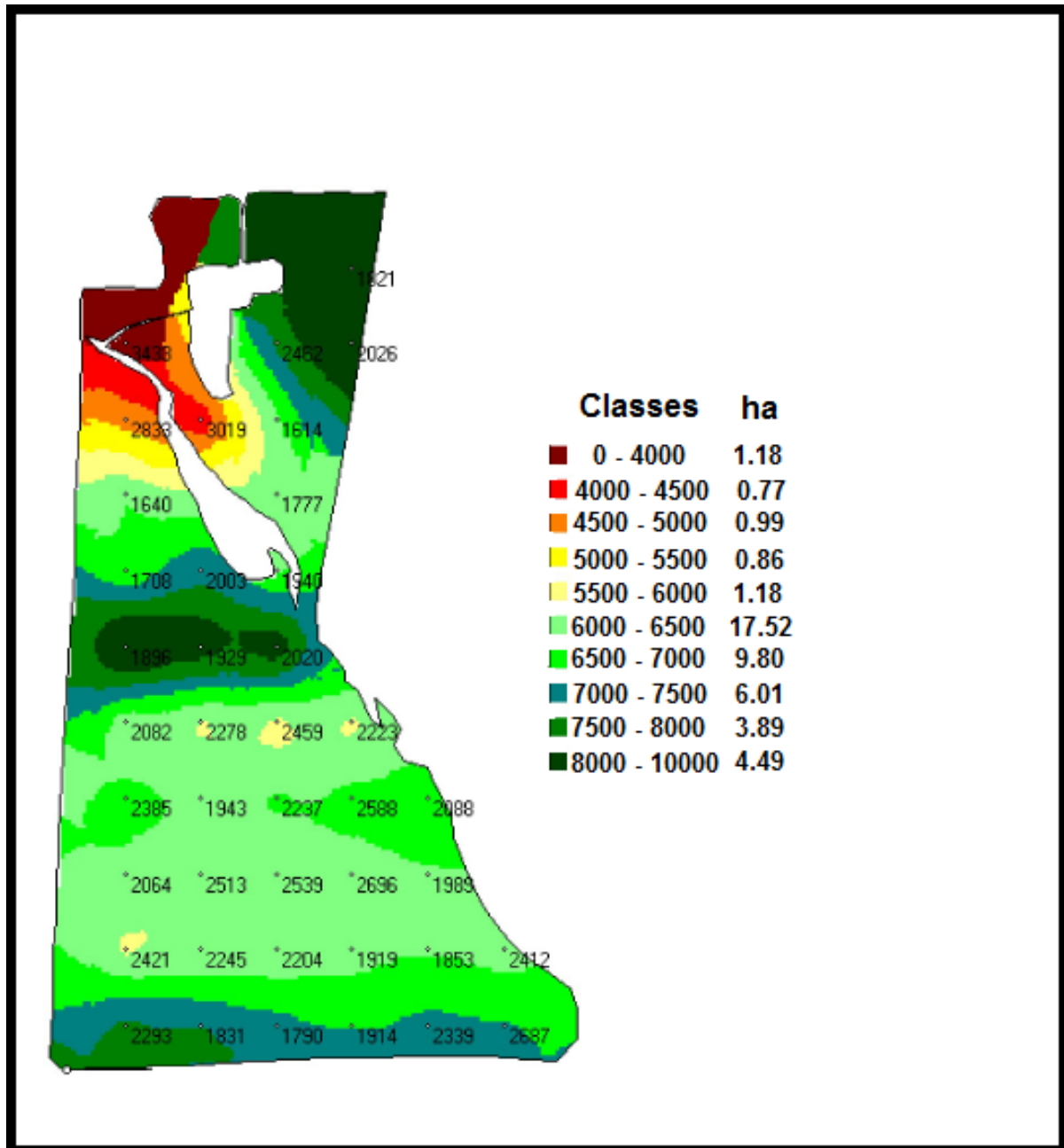


Figura 18 – Sobreposição de dados de produtividade da cultura do milho safra 2012/13 e resistência à penetração na profundidade de 0,07-0,14 m. Cores representam os valores interpolados de produtividade e os números os valores médios de resistência a penetração.

Outra causa da variabilidade na produtividade pode ser explicada pelo relevo do terreno. Como mostra a figura 19, o relevo da área possui grande variação na elevação. A parte mais baixa da área apresenta menos de 245 metros de altitude e, na parte mais alta da área, observam-se valores ao redor de 295 metros, representando assim uma diferença de nível de 50 metros. Ao comparar os dados do mapa de altitude com o rendimento da cultura, na figura 17, é possível identificar uma correlação bastante expressiva entre eles. Nas áreas de

baixada a produtividade foi mais elevada, bastante influenciada pela declividade do terreno, onde pode ter ocorrido um acúmulo de umidade. Isto promovendo melhor desenvolvimento da cultura, pois no ano da amostragem da produtividade ocorreu estiagem no período crítico de desenvolvimento da cultura.

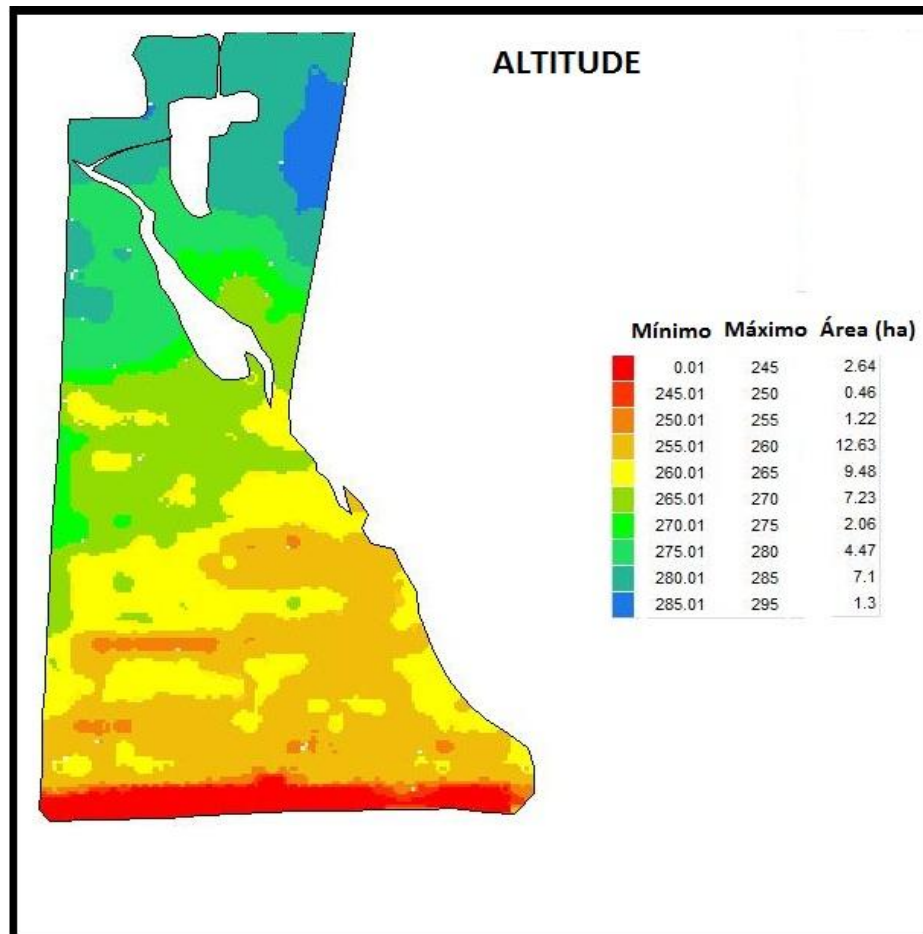


Figura 19 – Mapa de altitude da área no ano de 2013

Desta forma, na definição de zonas diferenciadas de manejo, deve-se levar em consideração a declividade do terreno, atrelando a estas possíveis influências sobre a produtividade das culturas. Sabe-se que o rendimento é influenciado por inúmeros fatores, sendo a declividade, um fator preponderante e que exerce muita influência, principalmente em condições adversas de solo e clima.

A proposta de definição de zonas de manejo apresentada neste trabalho busca identificar possíveis correlações entre a compactação do solo, através dos valores de RP com

a produtividade da cultura. Levando em consideração que a condição química do solo já foi corrigida, a variabilidade na produtividade depende de outros fatores. Entre esses fatores, a compactação do solo, ou seja, a alteração das condições físicas do solo pode estar influenciando diretamente a produtividade das culturas. Sabe-se que as condições físicas do solo são diferentes, dependendo das condições de relevo. Assim, o estudo da declividade é um fator importante na determinação do manejo físico do solo.

Ao analisar os dados de RP nas diferentes zonas de produtividade, evidencia-se a influência da compactação do solo na produtividade da cultura. Na zona de alta produtividade, como mostra a figura 20 não possui impedimento físico ao crescimento radicular, ao contrário do que acontece na zona de baixo rendimento em que a uma profundidade de 0,05 m já passa a apresentar problemas de compactação. Assim, em condições de déficit hídrico a cultura passa a sofrer estresse antecipado quando comparada com as plantas que possuem sistema radicular bem desenvolvido. Há exploração de um maior volume de solo, e conseqüentemente maior volume de água disponível.

Como se constata na figura abaixo, levando em consideração a distribuição da RP no perfil do solo na zona de média produtividade, o impedimento físico ocorre a uma profundidade aproximada de 0,09 m. Comparando-se aos dados obtidos na zona de baixa, observa-se que o crescimento radicular é impedido a uma maior profundidade, justificando o maior rendimento observado em relação à zona de baixa. As camadas compactadas e com baixa porosidade definem o limite do crescimento radicular das plantas (Montagu et al., 2001).

E da mesma forma, ao comparar esses dados com os da zona de alto rendimento, pode-se afirmar que o rendimento da cultura está diretamente relacionado com o crescimento radicular, pois este é responsável pela absorção de água e nutriente pelas plantas.

Portanto, a compactação do solo causa limitação ao crescimento radicular, exercendo variação na produtividade das culturas. Segundo Kaiser et al., (2009) apud Silva et al., (2004); Streck et al. (2004); Veiga et al., (2007), as propriedades físicas do solo são variáveis no tempo e no espaço, sendo alteradas pelas condições de manejo do solo e pelas variações climáticas ocorridas no período. O revolvimento ou a compactação do solo são as principais formas de alterar a sua estrutura, refletindo-se em modificações na sua densidade e na quantidade, continuidade e tamanho dos poros do solo. Devido a essas alterações, o solo apresentará comportamento diferenciado na resistência ao crescimento das raízes, nas trocas gasosas e na retenção e disponibilidade de água.

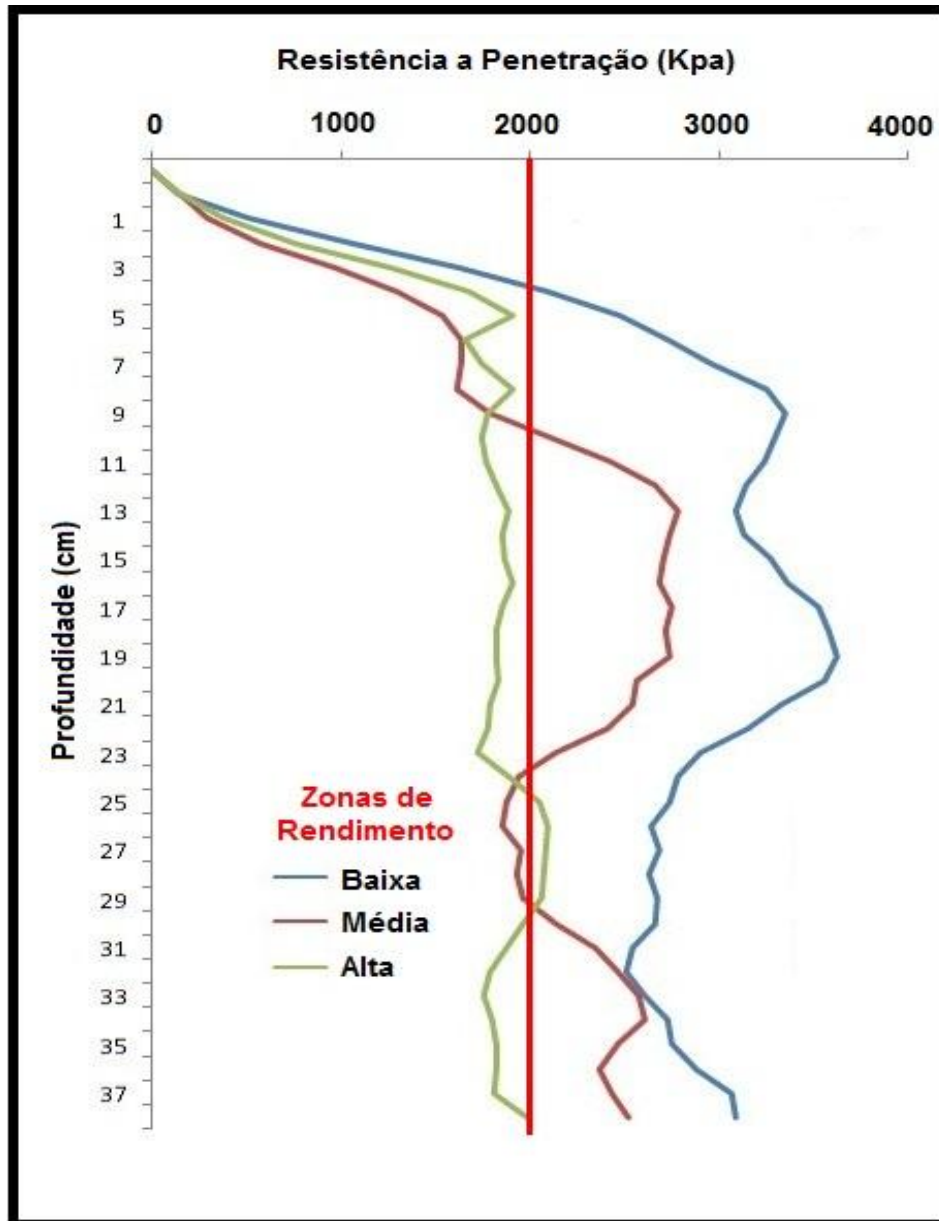


Figura 20 – Distribuição da resistência à penetração ao longo do perfil do solo nas zonas de baixa, média e alta produtividade na cultura do milho safra 2012/2013.

Com base nos teores de MO obtidos na reamostragem da área, a uma relação direta, com as zonas de maior RP, observados no extremo norte do mapa. Sabe-se que a MO atua como um agente aerador do solo, possibilitando melhorias nas condições físicas. Como se observa na Figura 21, os teores de MO são menores exatamente nos locais onde a RP apresenta valores maiores. Além disso, na camada de 0,10-0,20 m os teores de MO decaem da mesma forma que os níveis de RP aumentam. Tal fato explica a relação existente entre os dois atributos.

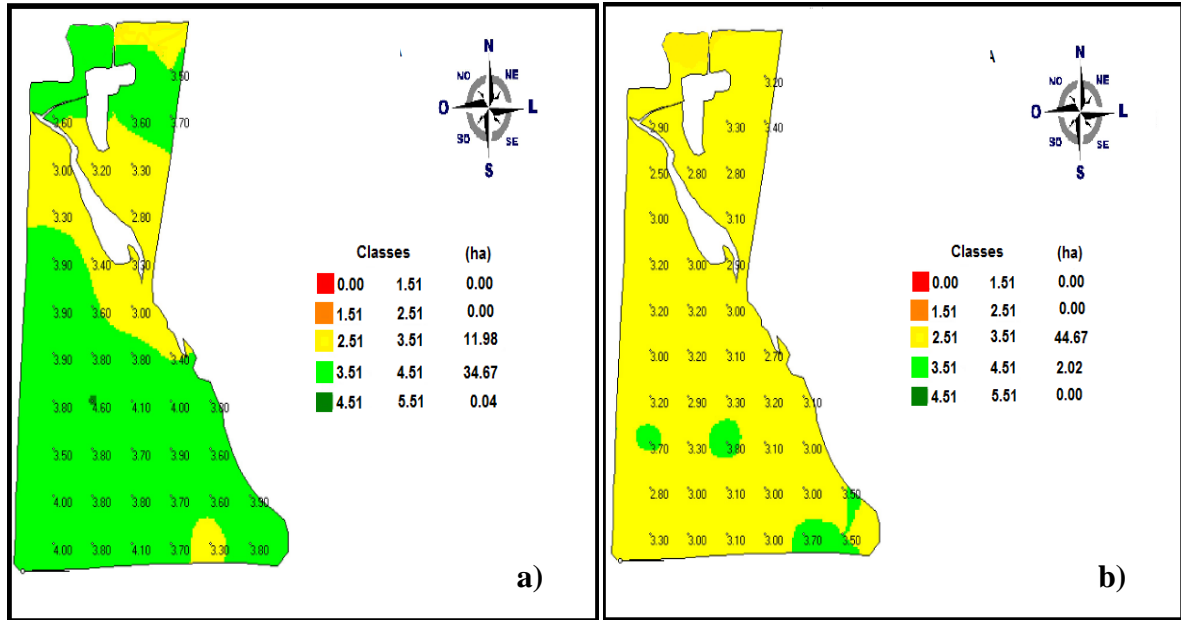


Figura 21 – Teores de Matéria Orgânica do solo na camada de 0-0,10 m (a) no ano de 2010 e Teores de Matéria Orgânica na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2010.

Ao avaliarmos a correlação existente entre os níveis de produtividade e a RP, pode-se criar um gráfico linear de correlação entre os dois fatores. Na figura 22, é evidenciada a interação entre esses fatores. Valores de RP menores que 2000 Kpa, promoveram um rendimento satisfatório na cultura, produzindo mais de 7000 Kg ha⁻¹. Ao contrário, com elevados valores de RP, acima de 2000 Kpa, observa-se uma curva descendente na produtividade. Isso chega a menos de 4500 Kg ha⁻¹ e grãos em uma condição onde a RP apresentou valores superiores a 3200 Kpa.

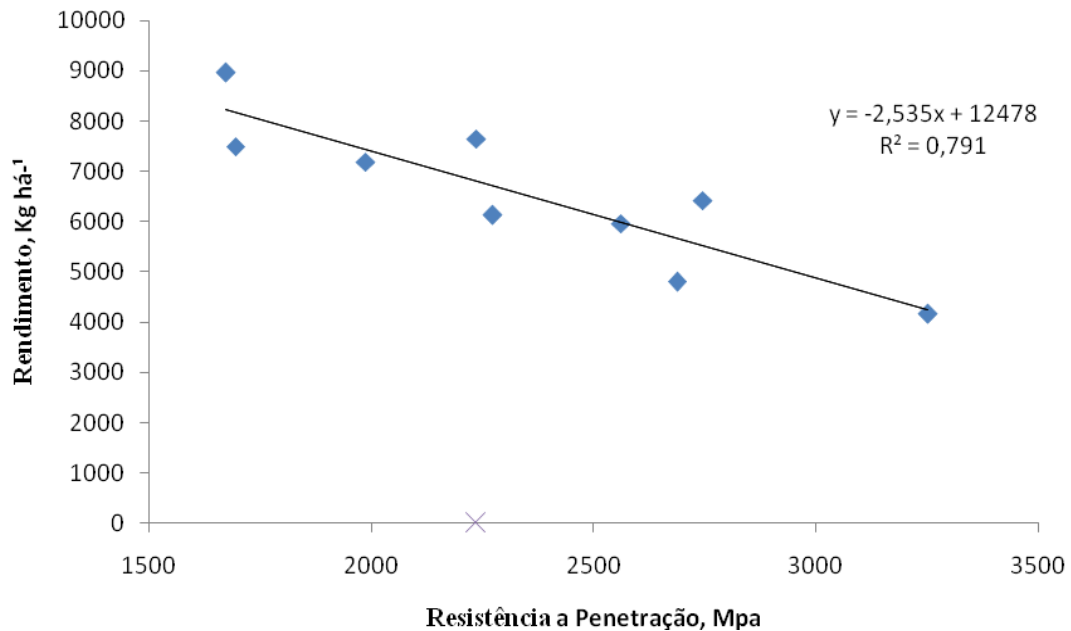


Figura 22 – Rendimento da cultura do milho safra 2012/13 em função da resistência a penetração na média da profundidade de 0 a 0,40 m de cada ponto amostral.

Levando em consideração a variabilidade física existente na área e sua comparação com os dados de produtividade é possível identificar zonas diferenciadas. Elas podem ser caracterizadas como zonas de manejo, podendo assim, serem adotadas técnicas de maneira localizada o que diminui os custos de produção, bem como proporciona um aumento na produtividade das culturas.

Em análise da correlação dos dados de RP e produtividade das culturas, é possível identificar três zonas diferenciadas como ilustra a Figura 23. A partir disso, o mapa montado permite uma intervenção física, seja pelo uso da escarificação, ou pelo uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo. Essa técnica trará ao produtor economia na intervenção, já que uma pequena porção da área, como mostra a figura, necessita de manejo.

Para a elaboração do mapa da zona de manejo foi utilizado os dados de RP da profundidade de 0,07-0,14 m. Esta camada é caracterizada por desenvolver maior impedimento físico ao desenvolvimento radicular. Os dados de produtividade foram obtidos no ano agrícola 2012/2013, com a cultura do milho. Para avaliar a correlação existente entre esses atributos, a avaliação estatística foi auxiliado pelo programa CR Campeiro.

Para diferenciar a correlação existente entre os fatores avaliados, o mapa foi gerado a partir de três zonas. A zona caracterizada pela cor vermelha indica a área mais compactada, com impedimento físico que afeta a produtividade da cultura. Na zona caracterizada pela cor

verde claro, trata-se de um local onde os níveis de RP são medianos, bem como a produtividade não alcança níveis máximos. Por fim, a zona caracterizada pela cor verde escuro, demonstra condições físicas favoráveis para o desenvolvimento das culturas e a produtividade mais elevada em relação às outras zonas de manejo.

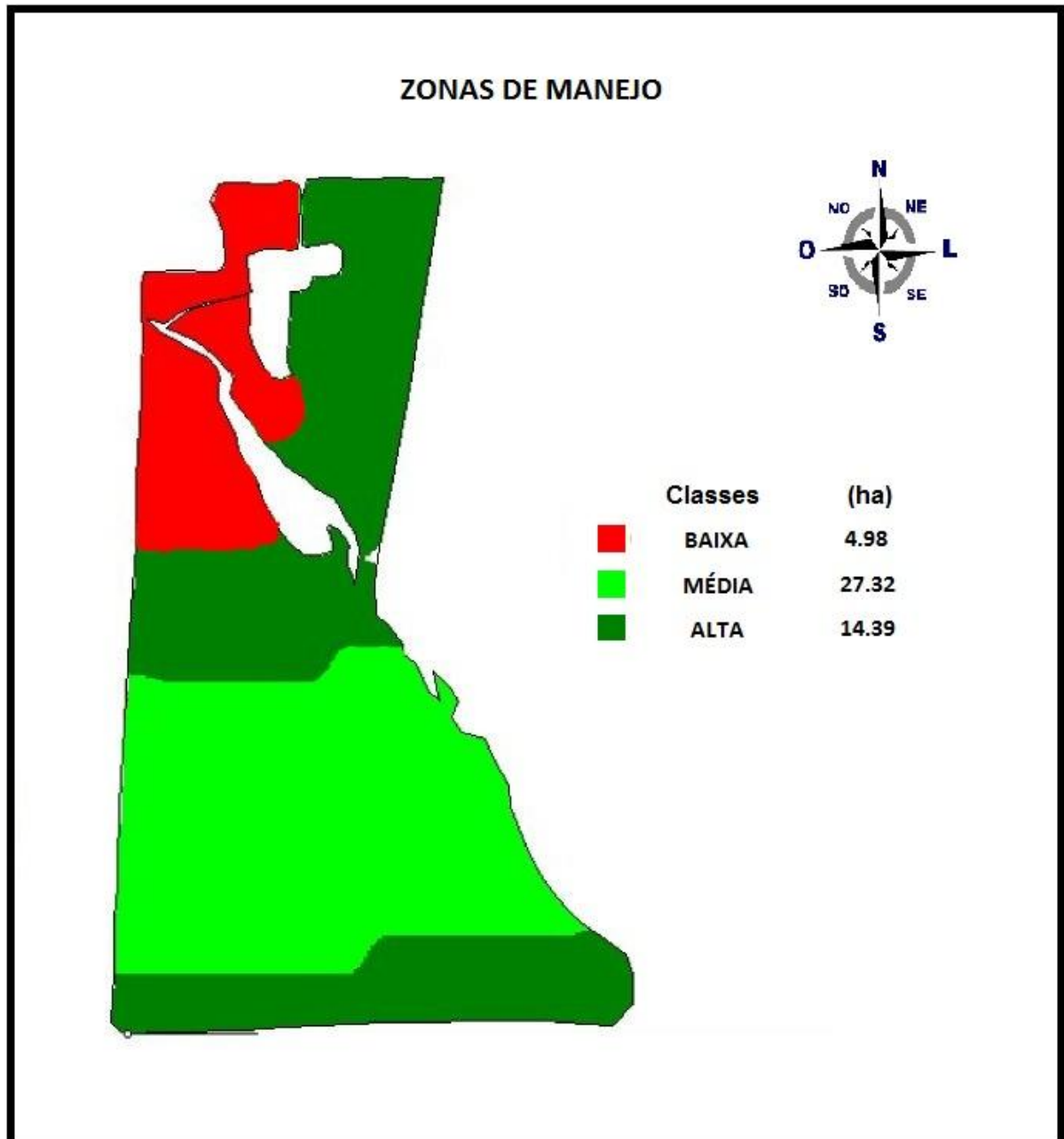


Figura 23 – Determinação de diferentes zonas de manejo a partir de dados de resistência à penetração na profundidade de 0,07 a 0,14 m e mapa de produtividade de milho safra 2012/13.

A construção de mapas de zonas de manejo é uma ferramenta complementar da AP, sendo mais uma forma de caracterizar a variabilidade espacial existente na lavoura. Assim, a determinação de zonas diferenciadas de manejo permite ao produtor intervir de maneira localizada, diminuindo seus custos operacionais, bem como diminuir a variabilidade espacial dos atributos do solo. Sabe-se que são múltiplos os atributos que influenciam a produtividade das culturas, sendo assim, a identificação desses atributos e sua caracterização espacial permite ao produtor tomar decisões embasadas em informações corretas e que demonstram a condição do solo.

A intervenção física do solo pode ser realizada de diferentes formas. Existem no mercado equipamentos para escarificação em sistema de plantio direto na palha, que possuem a característica de revolvimento mínimo da superfície do solo, mantendo a maior parte da palha sobre o solo. Essa operação deve ser feita com o solo seco, evitando assim a formação da camada conhecida como pé-de-grade, sendo essa causada pelo selamentos dos poros do solo a partir do atrito do equipamento em condições de solo muito úmido.

A utilização de plantas de cobertura consiste em uma forma eficiente e duradoura de descompactação do solo. Plantas como o nabo forrageiro possuem um sistema radicular bastante agressivo. Eles são capazes de alcançar grandes profundidades, mesmo em condições de solo compactada. Além disso, o nabo forrageiro é uma planta recicladora de nutrientes, trazendo nutrientes ao sistema que estavam sendo perdidos por lixiviação, ou em profundidade, onde o sistema radicular das culturas não alcançava.

Ao avaliarmos a variabilidade da produtividade, como mostra a figura 24, evidencia-se que grande parte da área apresenta produtividade superior a 6000 Kg ha⁻¹. Desta forma, com a intervenção física, já que está comprovada a influência da compactação sobre a produtividade, poderá aumentar de forma significativa a produtividade.

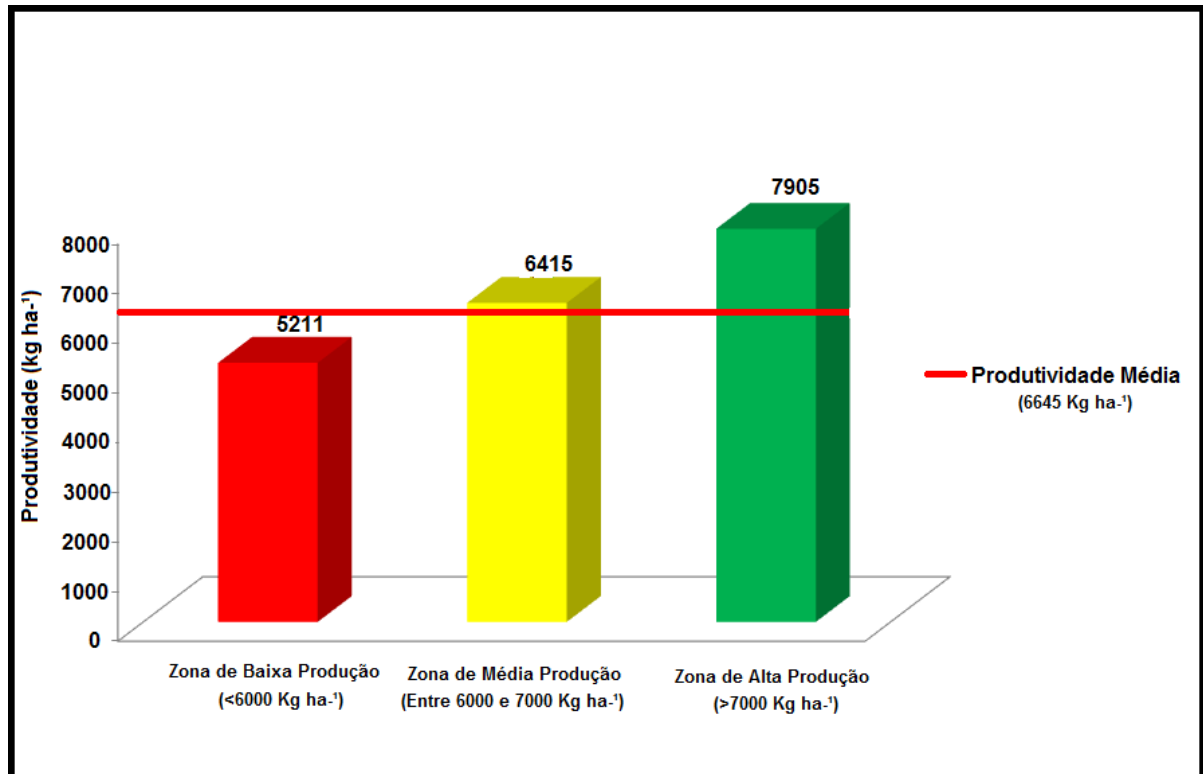


Figura 24 – Variabilidade da produtividade na cultura do milho safra 2012/13.

Observando a figura 25, grande parte da área apresenta média produtividade, em torno de 6000–7000 kg ha⁻¹. Do total da área estudada, apenas 11% da área apresenta baixa produtividade, com valores inferiores a 6000 Kg ha⁻¹, sendo que esta situação provoca uma diminuição considerável na média geral da área. No mapa de produtividade (figura 17) podemos observar valores de rendimento superiores a 8000 Kg ha⁻¹. Este é um valor referência de produtividade nas condições locais, sendo este um local onde as condições químicas, físicas e biológicas do solo são favoráveis ao desenvolvimento da cultura.

Considerando o exposto anteriormente, em um conceito prático, tomamos as áreas de alta produtividade como referência. Neste caso são avaliadas as condições químicas e físicas do solo, buscando extrapolar esta condição para o restante da área. Sabe-se que é difícil a homogeneização das características de fertilidade do solo, principalmente ao que se refere aos atributos físicos do solo, como textura e estrutura. De maneira geral, a estrutura física do solo pode ser alterada, seja pelo uso da escarificação ou pelo uso de plantas com sistema radicular agressivo capaz de explorar o solo em profundidade.

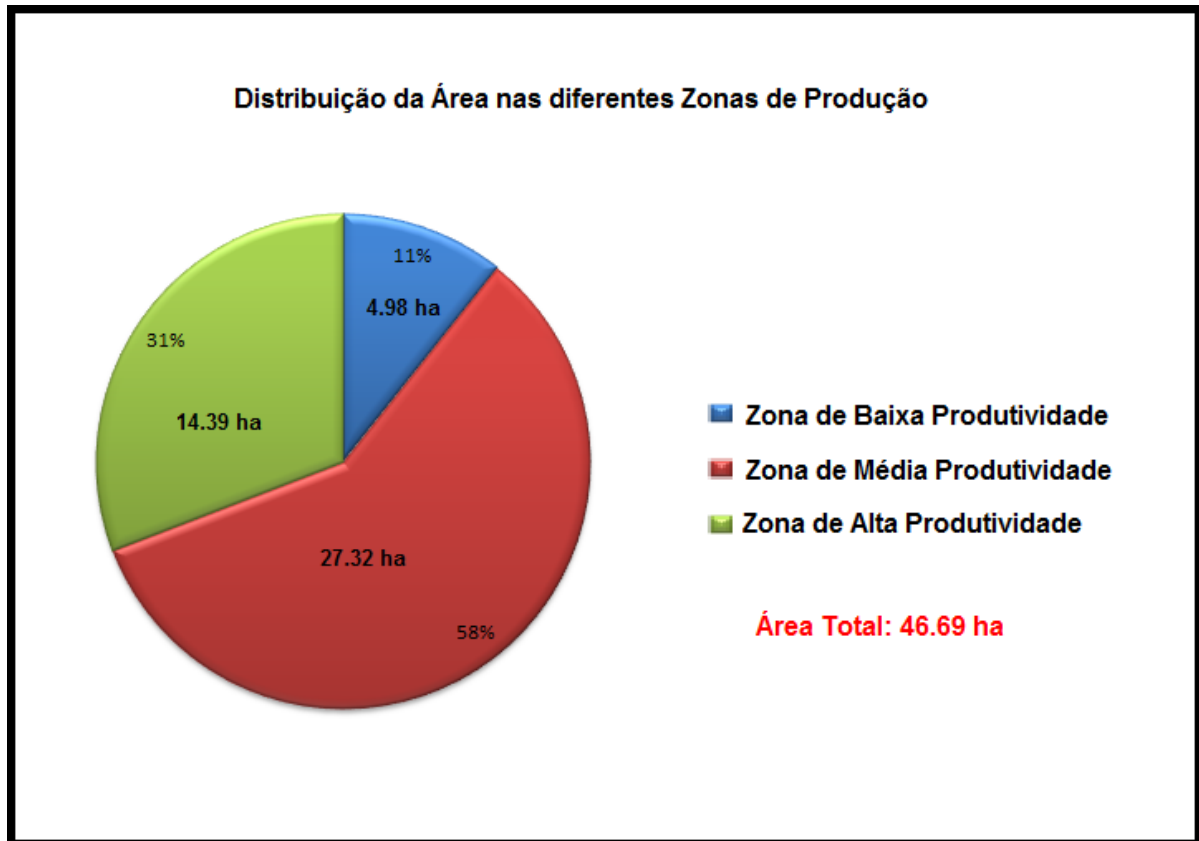


Figura 25 – Distribuição da área de acordo com a produtividade observada na cultura do milho safra 2012/2013.

Ao se simular a eliminação da zona de baixa produtividade da lavoura, ou seja, elevar a produtividade acima de 6000 Kg ha^{-1} , teria-se um ganho de $228,73 \text{ Kg ha}^{-1}$ de grãos, somando um total de 10.679 Kg de grãos colhidos. Nessa condição, a média geral de 6.645 Kg ha^{-1} seria aumentada para 6.873 Kg ha^{-1} , como mostra a Tabela 05. Ao observar os dados de RP nas áreas de baixa produtividade há valores elevados, podendo assim, atribuir-se em parte a produtividade a compactação do solo. Desta forma, a intervenção física do solo, seja por uma escarificação eficiente ou o uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo pode solucionar, ou ao menos amenizar, o impedimento físico ao crescimento radicular da cultura, e conseqüentemente aumentar a produtividade dessas áreas.

Outro cenário formado foi à elevação da produtividade das faixas de baixa e 50% da faixa de média produtividade para a zona de alta produtividade. Ou seja, elevar os níveis de produtividade acima de 7.000 Kg ha^{-1} em 65% da área, promovendo assim um acréscimo de $744,04 \text{ Kg ha}^{-1}$ de grãos. A promoção desta condição é dependente de diversos fatores. Entre eles pode-se destacar a influência da RP nos níveis de produtividade. Com isso, o manejo

localizado da área com a realização de uma intervenção física no solo, promove uma melhoria na estrutura física do solo o que pode exercer efeitos positivos na produtividade da cultura.

Tabela 5 – Análise dos efeitos das zonas de produtividade, na produção média da cultura do milho safra 2012/13.

Situação atual da área estudada				
Zonas de Produtividade	Área (ha.)	Produção (Kg ha⁻¹.)	Porcentagem (%)	
Baixa	4,98	5.210	10,67	
Média	27,32	6.414	58,51	
Alta	14,39	7.904	30,82	
Média Geral	46,69	6.645	100,00	
Cenário 1: Considerando eliminar a Zona de baixa produtividade				
Zonas de Produtividade	Área (ha.)	Produção (Kg ha⁻¹.)	Porcentagem (%)	Ganho (Kg ha⁻¹.)
Baixa	0	0	0,00	
Média	32,3	6.414	69,18	
Alta	14,39	7.904	30,82	
Média Geral	46,69	6.873	100,00	228,73
Cenário 2: Considerando o aumento de 50 % da área da Zona de média para a de Alta produtividade				
Zonas de Produtividade	Área (ha.)	Produção (Kg ha⁻¹.)	Porcentagem (%)	Ganho (Kg ha⁻¹.)
Baixa	0	0	0,00	
Média	16,15	6.414	34,59	
Alta	30,54	7.904	65,41	
Média Geral	46,69	7.389	100,00	744,04

6 CONCLUSÕES

As intervenções químicas realizadas a taxa variável promoveram melhorias significativas nos teores de pH, fósforo e potássio da área. A correção dos níveis de pH é mais rápida na camada superficial, sendo um processo construtivo no solo, para as camadas mais profundas.

Em reamostragem, identificou-se uma melhoria significativa nos teores de fósforo na camada de 0,10 a 0,20 m, com ausência de áreas com teor muito baixo, e 20%, 58%, 22% da área encontram-se nas faixas de interpretação, baixo, médio e alto, respectivamente. A realização das intervenções de correção a taxa variada mostraram-se eficientes, elevando os teores médios de K, em 15%, na camada superficial e 35% na camada subsuperficial.

Os atributos físicos do solo promovem influência direta na produtividade das culturas. Desta forma, as correlações dos dados de resistência à penetração e mapas de produtividade permitem identificar zonas diferenciadas de manejo. Neste caso, é possível intervir de maneira localizada e diminuir os custos operacionais, bem como a variabilidade espacial das condições de compactação do solo.

7 CONSIDERAÇÕES

As próximas intervenções químicas sugeridas terão o objetivo de elevar os teores de pH a 6,0. Além disso, será realizada avaliação para utilização de gesso agrícola, atuando como um condicionador do solo em profundidade.

A construção de zonas de manejo através de dados de RP e produtividade devem ser acompanhadas de maneira diferenciada, necessitando de avaliações no decorrer dos anos para elevar o histórico destes dados no sentido de validar os resultados deste trabalho, já que a variabilidade da produtividade é dependente de diversos fatores.

A intervenção física do solo, nas zonas diferenciadas de manejo deve ser feita em condições ideais de umidade do solo, com equipamentos eficientes e que permitam trabalhar a uma profundidade superior à camada compactada identificada.

A utilização de plantas de cobertura é uma forma eficiente que permite diminuir os efeitos nocivos da compactação. Também permite a reciclagem de nutrientes, aumentando assim a produtividade das culturas. No plantio da cultura devem ser utilizadas grandes densidades de plantio, em espaçamento reduzido, com a utilização da semeadora de grãos miúdos, com espaçamento de 17 cm entre linhas. A elevada densidade de plantio favorece a formação de raízes mais finas, porém em grande número, tornando assim o processo de descompactação mais eficiente e duradouro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBA, P. J.; AMADO, T. J. C.; GIOTTO, E.; SCHOSSLER, D.; FIORIN, J. E. **Agricultura de precisão: mapas de rendimento e de atributos de solo analisados em três dimensões.** Enciclopédia Biosfera. Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol. 7, n. 13; 2011.
- AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Agricultura de precisão aplicada ao aprimoramento do manejo do solo. In: FIORIN, J. E., (ed.) **Manejo da Fertilidade do Solo no Sistema Plantio Direto.** Passo Fundo, Berthier, 2007. p. 99-144.
- BELLÉ, G. L.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; PONTELLI, C. B.; DELLAMEA, R. B. C. **Caracterização dos Atributos do Solo em Zonas de Manejo a partir do Uso de Instrumentos de Agricultura de Precisão.** Santa Maria, 2009.
- BRASIL. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Rio Grande do Sul.** Recife. 431p. (Boletim Técnico, 30)
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 10. ed. Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul: UFGRS, 2004. 400p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo** – Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 1999. XXVI, 412 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FIORIN, J. E. BERTOLLO, G. M., WYZYKOWSKY, T. Adubação fosfatada e potássica para alta produtividade: proposta de nova recomendação. In: XVII Seminário Interinstitucional de Ensino, Pesquisa e Extensão, XV Mostra de Iniciação Científica e X Mostra de Extensão, 2012, Cruz Alta – RS. **Anais...** Cruz Alta – RS: UNICRUZ, 2012.
- FIORIN, J. E.; SCHNELL, A.; RUEDELL, J. **Diagnóstico das propriedades rurais na região de abrangência das cooperativas COOPATRIGO, COOPEROQUE, COTAP, COTRISA, COTRISAL (SB) e TRITÍCOLA.** Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2007. 176p.
- GIOTTO, E; ROBAINA, A. D. & SULZBACH, L. **A Agricultura de Precisão com o Sistema CR Campeiro,** Manual do Usuário, 330p. 2004.
- GIOTTO, Enio; SULZBACH, L.; ANTUNES, M. U. F. **Evolução temporal da produtividade de uma lavoura de soja - Estudo de caso.** Geomática, Santa Maria, v. 1, n. 1, 2006.

- GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 2006. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/.../gomes_filizola_indicadores. Acesso em: 15 abril de 2013.
- JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, G. W.; FILHO, J. V. de A.; ASSIS, R. L. de; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Ver. Bras. Eng. Agr. Ambiental**, vol.12 no. 2. Campina Grande. Mar./Apr. 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000200002. Acesso em: 04 abril de 2013.
- KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2009, vol. 33, n. 4, pp. 845-855. ISSN 0100-0683.
- KILPP, A. R. **Fieldstar: atual estágio de utilização no Brasil**. In: BALASTREIRE, L. A. Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001. Piracicaba, SP: ESALQ, 2002. p. 10-15.
- MAPA. **Agricultura de Precisão**. Boletim Técnico. Brasília, DF. 2011. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Boletim%20T%C3%A9cnico%20AP.pdf>. Acesso em: 15 abril de 2013.
- MOLIN, J. P. **Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade**. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/molin/definicao.pdf>. Acesso em: 15 de abril de 2013.
- MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92. 2002.
- MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P & ATWELL, B. J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. **J. Exper. Bot.**, 52:2127-2133,2001.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretária da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46p.
- PES, L. Z.; AMADO, T. J. C.; DELLAMEA, R. B. C.; LEMAINSKI, M. C. L.; BELLÉ, G. L.; PIZZUTI, L.; SCHENATO, R.B.; FÜLBER, R. Projeto Aquarius/Cotrijal – Pólo de Agricultura de Precisão na Região do Alto Jacuí – RS. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2. **Resumos Expandidos...** São Pedro, SP, ESALQ/USP, 2006.
- PLANT, R. E.; MERMER, A.; PETTYGROVE, G. S.; VAYSSIERES, M. P.; YOUNG, J. A.; MILLER, R. O.; JACKSON, L. F.; DENISON, R. F.; PHELPS, K. Factors underlying grains yield spatial variability in three irrigated wheat fields. **Transactionsofthe ASAE**, St. Joseph, v. 42, n. 5, p. 1187-1202, 1999.
- REICHERT, M. R.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D. J. **Compactação do Solo em Sistemas Agropecuários e Florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação**. Tópicos Ci. Solo 5:49-134, 2007.

ROQUE, M. W.; MATSURA, E. E.; SOUZA, Z. M.; BIZARI, D. R.; SOUZA, A. L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, 32:1827-1835, 2008.

SANTI, A. L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SANTI, A. L.; DELLA FLORA, L. P. Monitoramento da compactação do solo em áreas de lavoura através do mapeamento da resistência à penetração. **Revista Plantio Direto**, 96: nov/dez. 2006.

SANTI, A. L. et al. Distribuição horizontal e vertical de fósforo e potássio em área manejada com ferramentas de Agricultura de Precisão. **Revista Plantio Direto**. Maio/Junho 2012.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto**. 2003. 169f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v.52, p91-611, 1965.

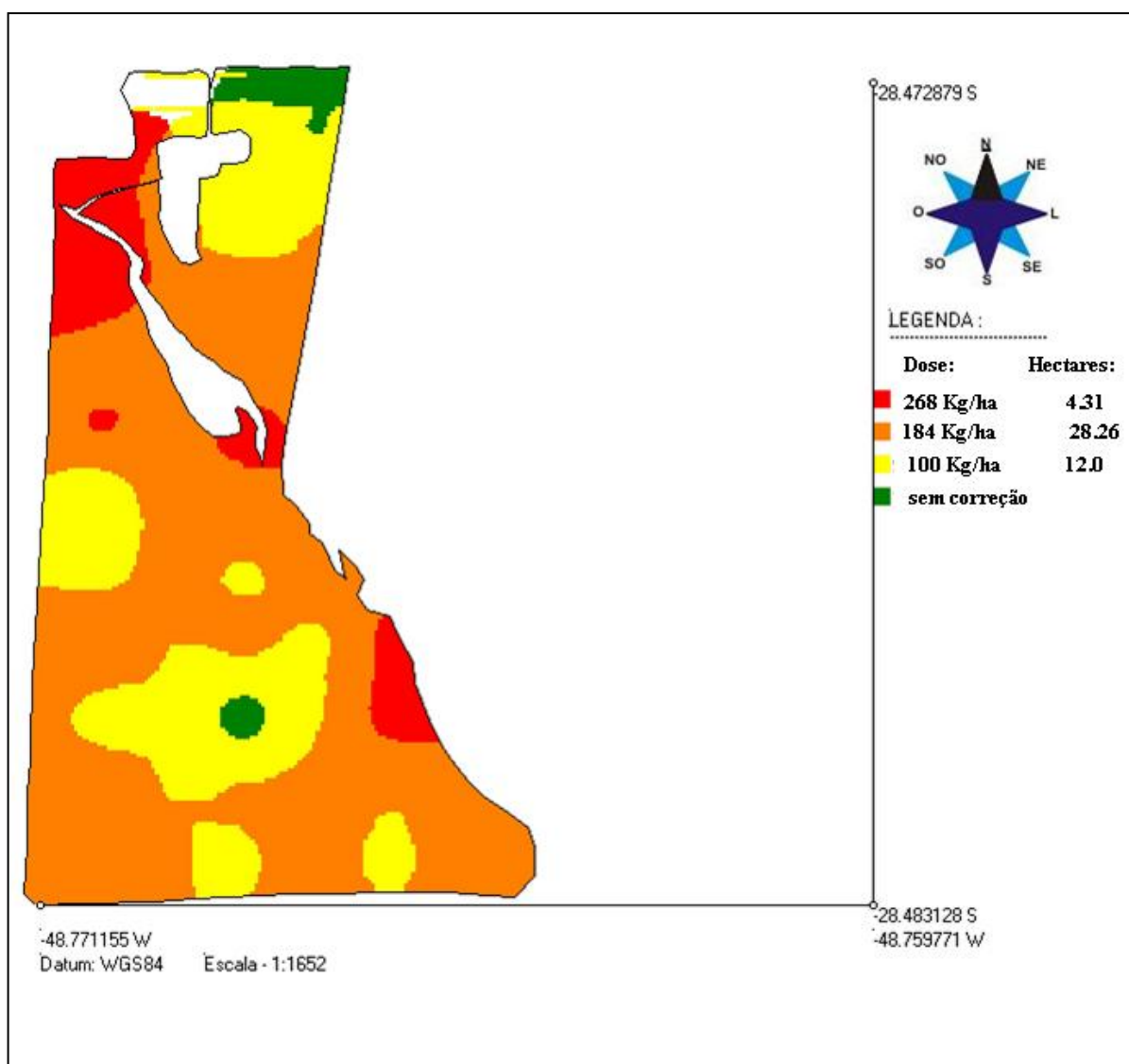
TRABACHINI, Aldie; MANTOAM, Edemilson José; PAVLU, Franz Arthur; MOLIN, Jose Paulo. **Definição de unidades de manejo baseado em mapas de produtividade**. Disponível em:
http://www.revistasapere.inf.br/download/agricultura_de_precisao_mapas_de_produtividade_unidades_de_manejo.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2013.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S. & UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Adv. Agron.**, 38:45-94, 1985.

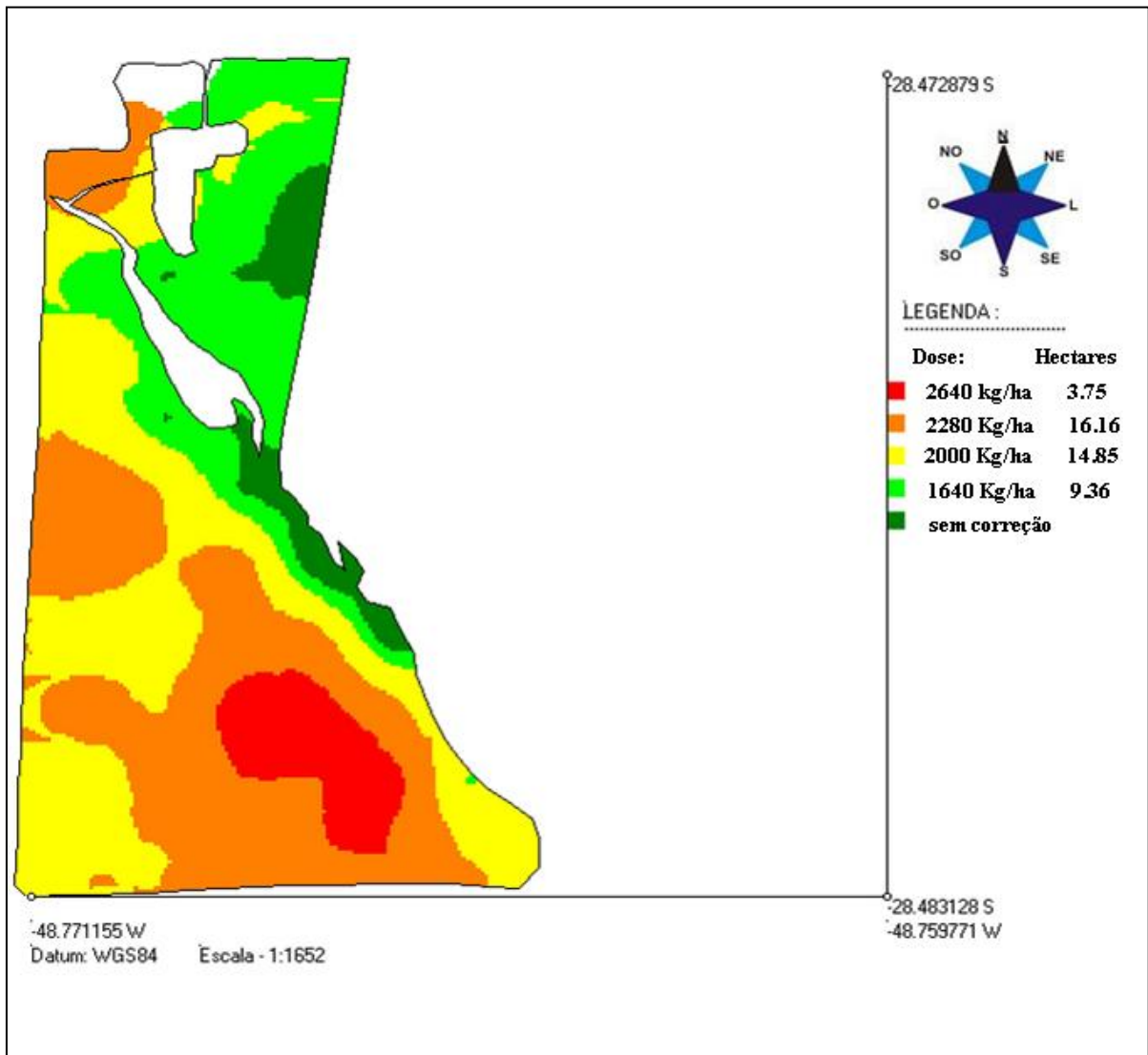
WARRICK, A. W.; NIELSEN D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980, p.319-344.

APÊNDICES

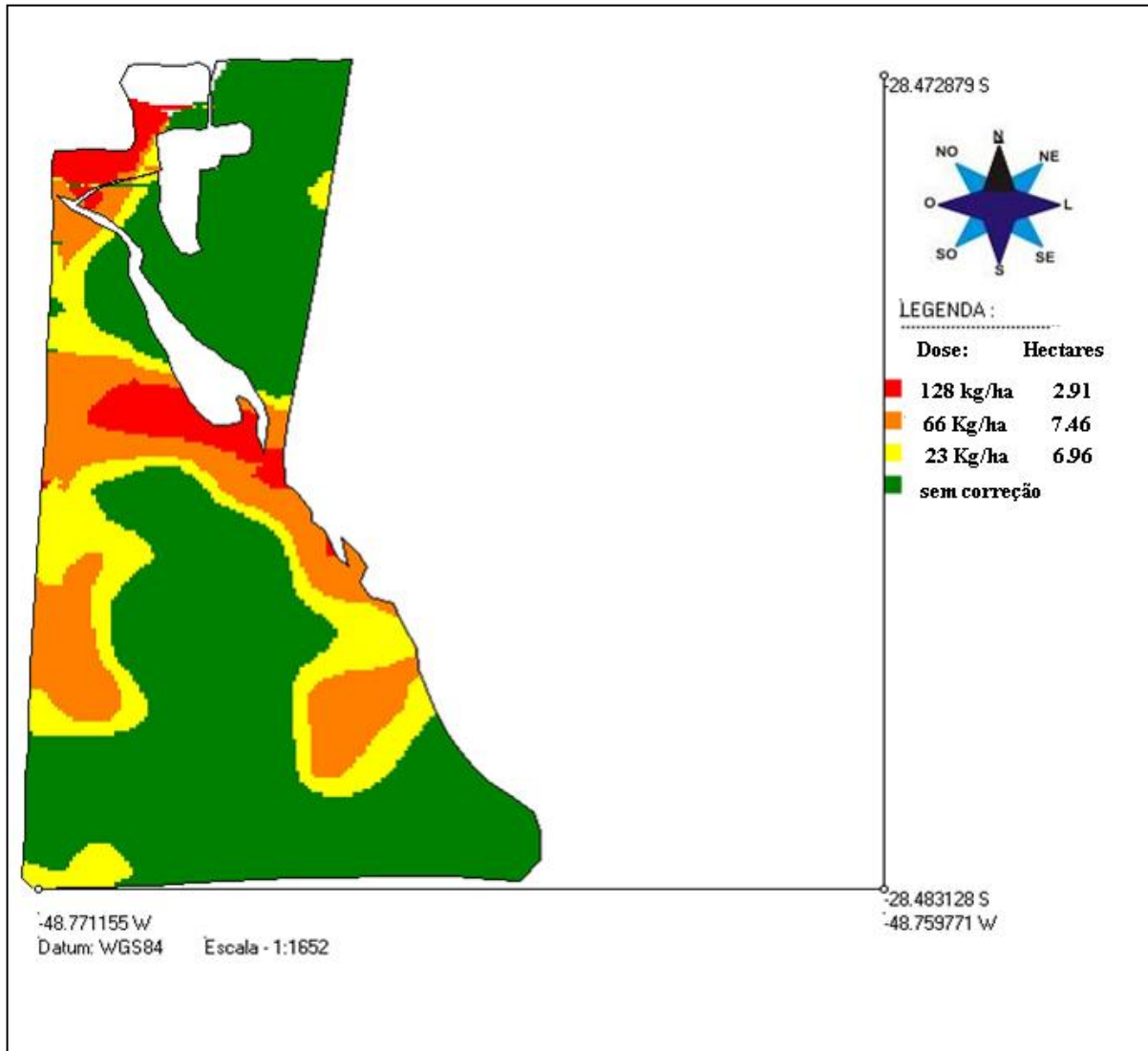
APÊNDICE A – Mapa de aplicação para correção de Super Fosfato Triplo no ano de 2008.



APÊNDICE B – Mapa de aplicação para correção de Calcário no ano de 2008.

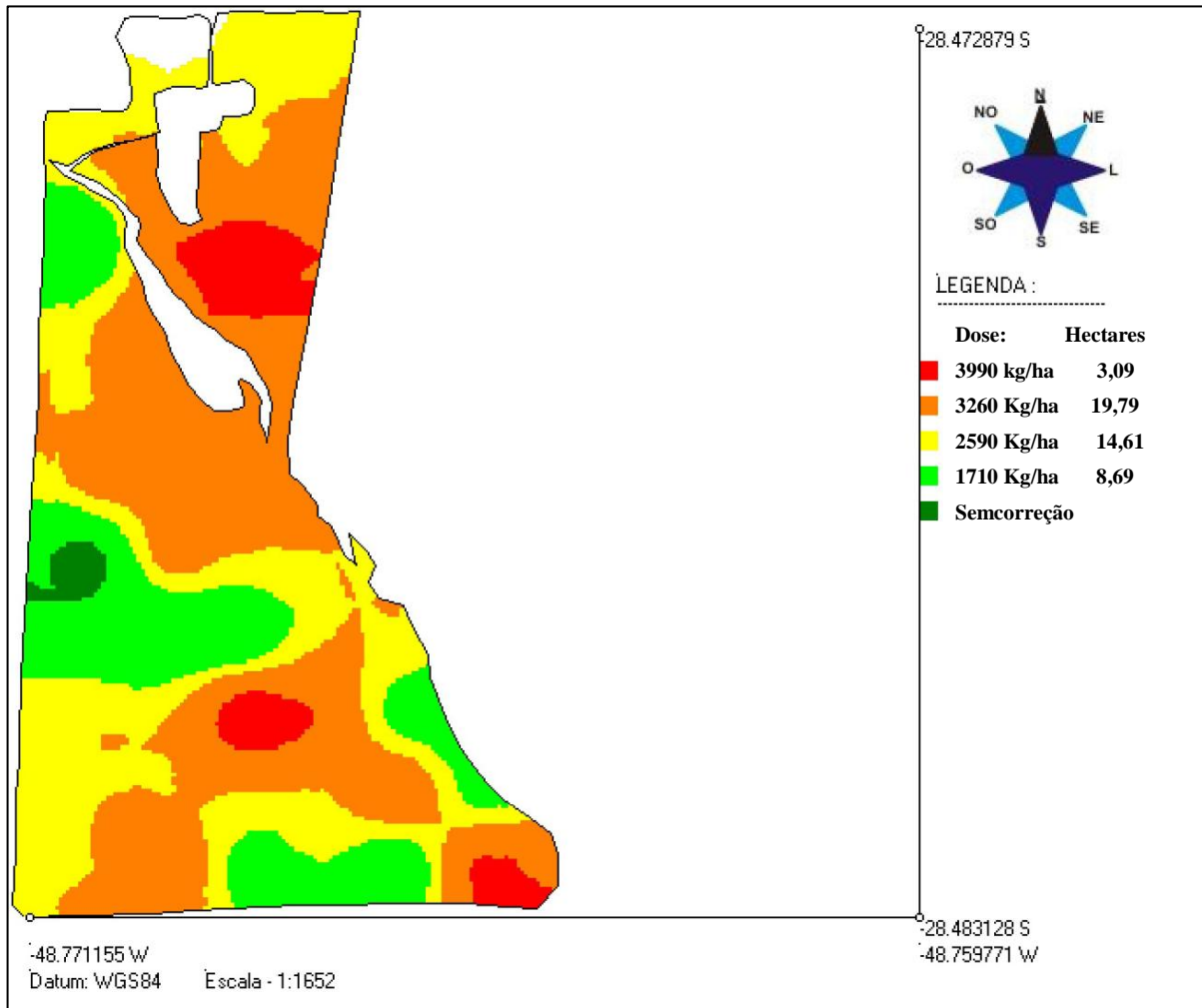


APÊNDICE C – Mapa de aplicação para correção de Cloreto de Potássio no ano de 2008.

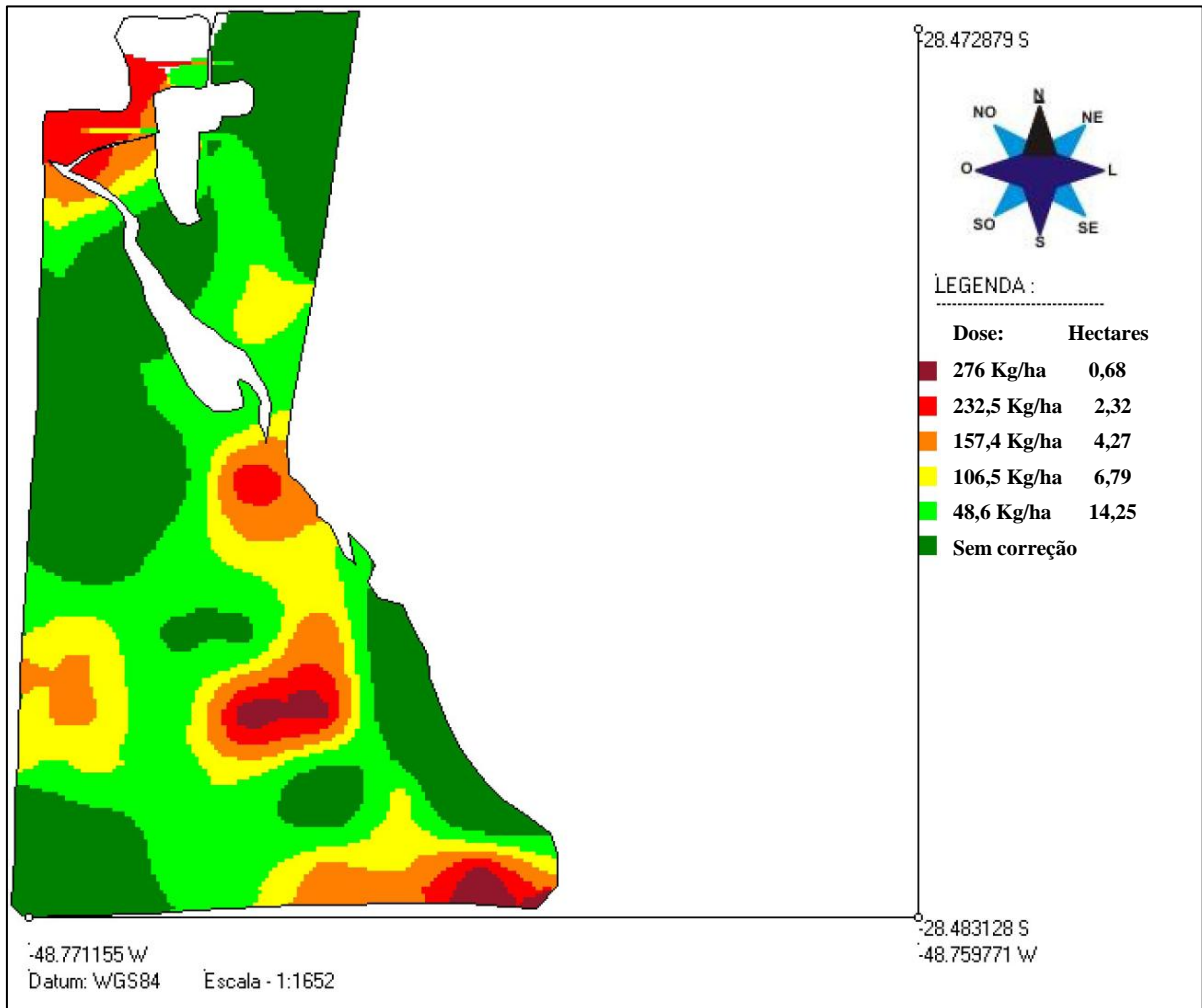


Mapa de aplicação para correção de Cloreto de Potássio no ano de 2008.

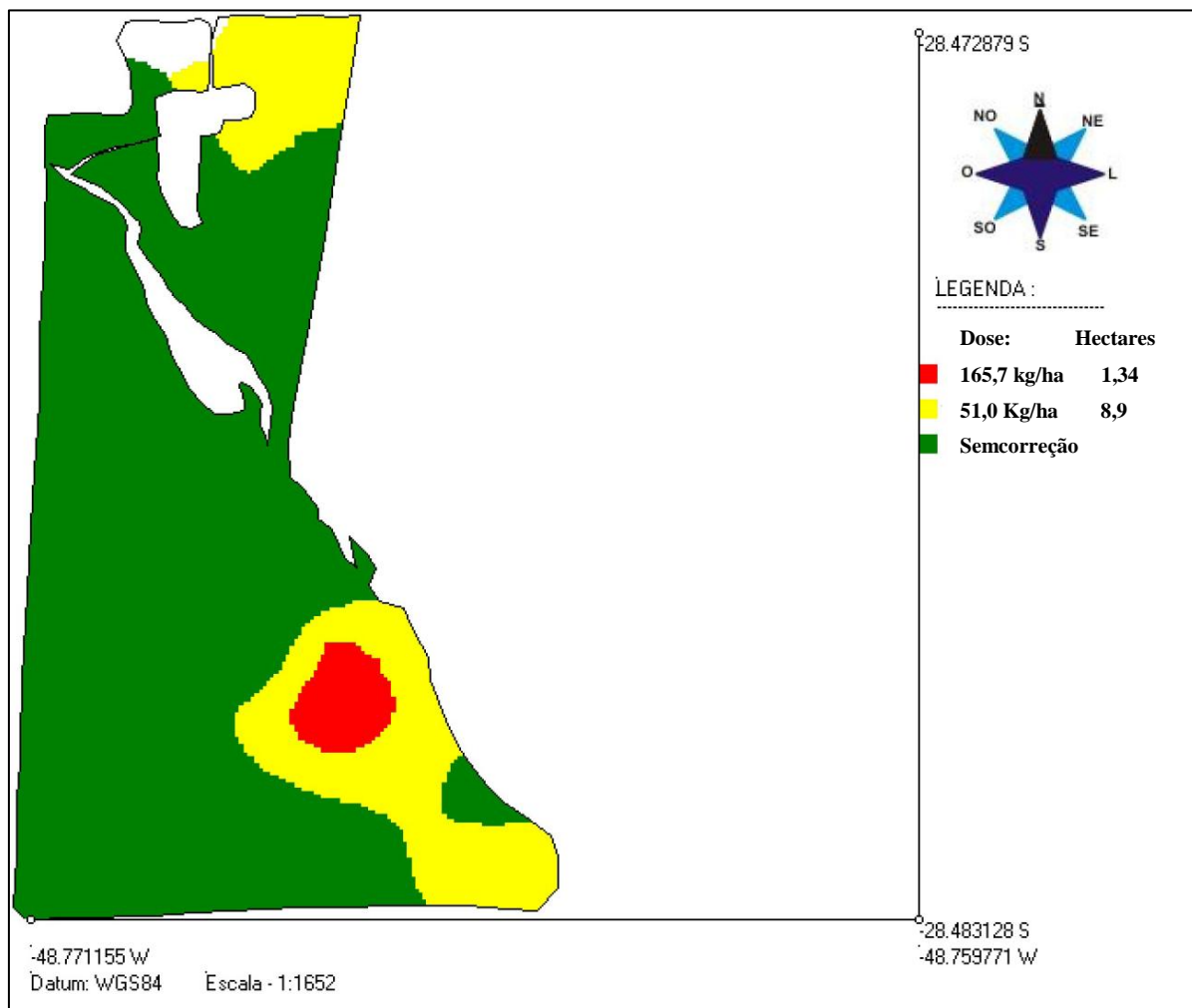
APÊNDICE D – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Calcário no ano de 2011.



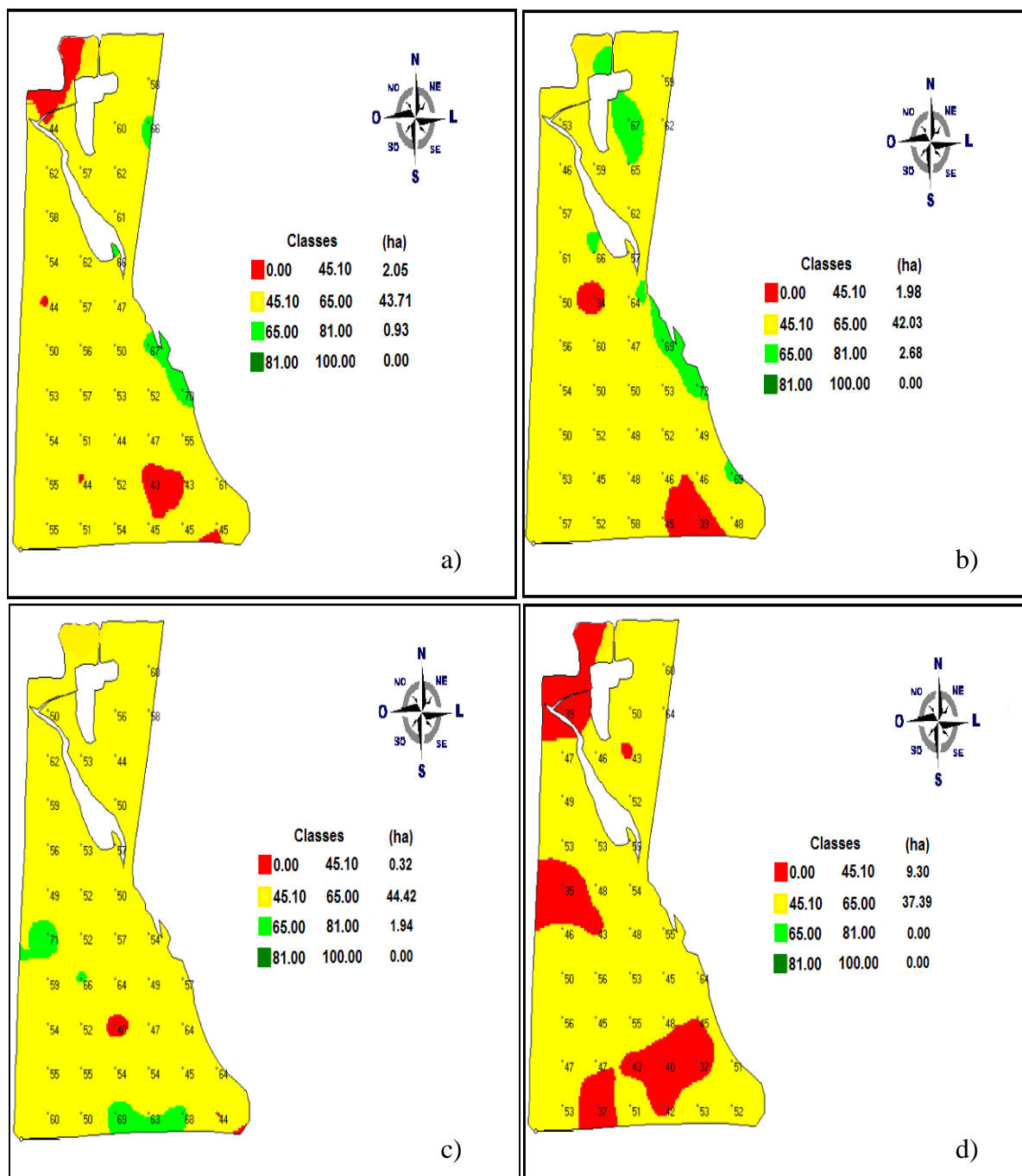
APÊNDICE E – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Super Fosfato Triplo no ano de 2011.



APÊNDICE F – Mapa de aplicação da reamostragem para correção de Cloreto de Potássio no ano de 2011.



APÊNDICE G – Mapas de Saturação de bases na profundidade 0-0,10 m (a) no ano de 2008; Saturação de bases na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008; Saturação de bases na camada de 0-0,10 m (c) no ano de 2010 e Saturação de bases na camada de 0,10-0,20 m no ano de 2010.



APÊNDICE H – Mapa de Argila na profundidade 0-0,10 m (a) no ano de 2008; Argila na camada de 0,10-0,20 m (b) no ano de 2008; Argila na camada de 0-0,10 m (c) no ano de 2010 e Argila na camada de 0,10-0,20 m no ano de 2010.

