

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AGRICULTURA DE PRECISÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR:
INSTRUMENTAÇÃO DE UMA COLHEDORA, MAPEAMENTO DA
PRODUTIVIDADE E DE ATRIBUTOS DO SOLO**

DOMINGOS GUILHERME PELLEGRINO CERRI

CAMPINAS
MAIO DE 2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AGRICULTURA DE PRECISÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR:
INSTRUMENTAÇÃO DE UMA COLHEDORA, MAPEAMENTO DA
PRODUTIVIDADE E DE ATRIBUTOS DO SOLO**

Tese de Doutorado submetida à
banca examinadora para obtenção do
título de Doutor em Engenharia
Agrícola, na área de concentração
em Máquinas Agrícolas.

**DOMINGOS GUILHERME PELLEGRINO CERRI
ORIENTADOR: PAULO SÉRGIO GRAZIANO MAGALHÃES**

CAMPINAS
MAIO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M56d Cerri, Domingos Guilherme Pellegrino
Agricultura de precisão em cana-de-açúcar:
instrumentação de uma colhedora, mapeamento da
produtividade e de atributos do solo / Domingos
Guilherme Pellegrino Cerri.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Agricultura - Mapas. 3.
Máquinas agrícolas. 4. Solos – Produtividades. I.
Magalhães, Paulo Sérgio Graziano. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Precision agriculture in sugar cane: instrumentation of a
harvester, yield and soil attributes mapping.

Palavras-chave em Inglês: Sugar cane, Precision agriculture, Yield map, Farm
machinery e Soil attributes.

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Nelson Luis Cappelli, José Paulo Molin, José Eduardo
Corá e Jose Ruy Porto de Carvalho

Data da defesa: 17/05/2005

À minha querida esposa Tatiana
por sua inestimável compreensão,
companheirismo e alegria

Com imenso amor,

Dedico

Aos meus pais Carlos e Ana, avó
Biloca e irmão Ado, pela vida,
educação, incentivo e formação
pessoal com muito amor

Ofereço

AGRADECIMENTOS

De maneira simples, mas, sincera, queremos registrar nossos agradecimentos e gratidão às seguintes pessoas e entidades, das quais, a experiência científica, os serviços técnicos e o apoio financeiro nos permitiram desenvolver esta pesquisa dentro de um ambiente seguro e tranquilo:

Ao Professor Doutor Paulo Sérgio Graziano Magalhães do Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI/UNICAMP pela dedicação com que me orientou e incentivou na elaboração desta pesquisa, em todos os momentos, desde de seu início até a redação final.

Aos técnicos da FEAGRI, Sr. José Maria da Silva pela efetiva colaboração em todas as fases do ensaio de campo e na construção das partes mecânicas do projeto e ao Sr. Leandro Moraes pelo eficiente apoio na confecção dos circuitos eletrônicos.

Ao Professor Doutor Nelson Luis Cappelli e ao Engenheiro Cláudio Umezu, ambos da FEAGRI/UNICAMP, pelo apoio oferecido para o desenvolvimento da instrumentação da colhedora.

Aos demais professores, técnicos, funcionários e em particular aos colegas Efraim, Ney, Daniel, Julio da FEAGRI, pelo apoio, amizade, incentivo demonstrados e pelas informações e esclarecimentos transmitidos durante a execução desta pesquisa.

Ao Professor Doutor Shrini Upadhyaya, do Biological and Agricultural Department da Universidade da Califórnia – Davis/EUA pela supervisão geral das atividades realizadas durante meu estágio nos Estados Unidos da América do Norte.

Ao Professor Doutor José Paulo Molin do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pelo empréstimo de alguns equipamentos e sobretudo pelas sugestões apresentadas durante a execução desta pesquisa.

Ao amigo Engenheiro Daniel Penteado pelo inestimável apoio na elaboração do programa de gerenciamento do sistema de mapeamento de produtividade.

À Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP pela oportunidade e facilidades concedidas à concretização desta pesquisa.

Aos diretores, funcionários e demais amigos da Usina São João Açúcar e Álcool de Araras, SP por cederem a área, disponibilizarem suas colhedoras para os ensaios de campo e pelo excelente apoio logístico e operacional demonstrado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da USP pela disponibilidade nas análises de solo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP expressamos nosso reconhecimento pela bolsa de doutorado concedida (processo 01/14376-5) e pelo auxílio a pesquisa que proporcionou as condições materiais de apoio a essa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão de uma bolsa para Estágio de Doutorando no Exterior, Universidade da Califórnia – Davis, processo BEX2334/02-0

A todos aqueles que, de alguma forma contribuíram nas diversas etapas do trabalho, muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO	4
2.2 GEOESTATÍSTICA: CONCEITOS E FUNDAMENTOS GERAIS.....	6
2.3 APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA EM ESTUDOS DE PROPRIEDADES DO SOLO.....	8
2.4 MAPEAMENTO DE PRODUTIVIDADE.....	11
2.5 SENSORES DE PRODUTIVIDADE	12
2.6 SENSORES DESENVOLVIDOS PARA O MAPEAMENTO DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE - AÇÚCAR.....	14
2.7 CORRELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE E PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO	17
3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
4. AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO DE UMA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA	23
4.1 RESUMO.....	23
4.2 SUMMARY.....	24
4.3 INTRODUÇÃO	25
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.4.1 <i>Coleta das amostras de solo – primeiro ano.....</i>	<i>26</i>
4.4.1.1 <i>Amostrador de solo.....</i>	<i>27</i>
4.4.1.2 <i>Amostragem do solo</i>	<i>29</i>
4.4.1.3 <i>Determinação da compactação do solo</i>	<i>32</i>
4.4.2 <i>Coleta das amostras de solo – segundo ano.....</i>	<i>33</i>
4.4.2.1 <i>Amostragem do solo</i>	<i>34</i>
4.4.2.2 <i>Determinação da compactação do solo</i>	<i>34</i>
4.4.3 <i>Preparo das amostras de solo</i>	<i>35</i>
4.4.4 <i>Análise física e química das amostras de solo</i>	<i>38</i>
4.4.5 <i>Análise geoestatística dos resultados e espacialização</i>	<i>38</i>
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.5.1 <i>Resultados do primeiro ano de amostragem.....</i>	<i>40</i>
4.5.1.1 <i>Estatística descritiva clássica.....</i>	<i>40</i>
4.5.1.2 <i>Análise semivariográfica.....</i>	<i>45</i>
4.5.1.3 <i>Compactação do solo.....</i>	<i>60</i>
4.5.2. <i>Segunda coleta.....</i>	<i>61</i>
4.5.2.1 <i>Estatística descritiva clássica.....</i>	<i>61</i>

4.5.2.3 <i>Compactação do solo</i>	66
4.6 CONCLUSÕES	66
5. CORRELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO.....	67
5.1 RESUMO.....	67
5.2 ABSTRACT.....	67
5.3 INTRODUÇÃO	68
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
5.4.1 <i>Área de estudo e base de dados utilizada</i>	70
5.4.2 <i>Mapeamento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar</i>	70
5.4.3 <i>Correlação dos dados de produtividade com os atributos físicos e químicos do solo</i>	75
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.5.1 <i>Atributos físicos e químicos do solo</i>	76
5.5.2 <i>Mapeamento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar</i>	76
5.5.3 <i>Correlação dos dados de produtividade com os atributos físicos e químicos do solo</i>	77
5.6 CONCLUSÃO	81
6. DESENVOLVIMENTO DE UM MONITOR DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	82
6.1 RESUMO.....	82
6.2 SUMMARY	82
6.3 INTRODUÇÃO	83
6.4 MATERIAL E MÉTODOS	84
6.4.1 <i>Funcionamento e descrição do monitor de produtividade de cana-de-açúcar</i>	84
6.4.2 <i>Testes de laboratório</i>	97
6.4.2.1 <i>Calibração do sensor de velocidade da colhedora</i>	98
6.4.2.2 <i>Calibração estática das células de carga</i>	99
6.4.2.3 <i>Calibração estática do sensor de ângulo</i>	100
6.4.2.4 <i>Calibração do sensor de peso</i>	100
6.4.3 <i>Teste de campo</i>	101
6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
6.5.1 <i>Testes de laboratório</i>	102
6.5.1.1 <i>Calibração estática do sensor de ângulo</i>	102
6.5.1.2 <i>Calibração do sensor de velocidade da colhedora</i>	103
6.5.1.3 <i>Calibração estática das células de carga</i>	104
6.5.1.4 <i>Calibração do sensor de peso</i>	105
6.5.2 <i>Teste de campo</i>	105
6.6 CONCLUSÕES	106
7. CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR: BASES PARA RECOMENDAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO VARIADA DE FÓSFORO, POTÁSSIO E CALCÁRIO	107
7.1 RESUMO.....	107
7.2 SUMMARY	108

7.3 INTRODUÇÃO	108
7.4 MATERIAL E MÉTODOS	110
7.4.1 Área de estudo e base de dados utilizada.....	110
7.4.2 Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar.....	110
7.4.2.1 Avaliação da acurácia dos dados de produtividade da cana-de-açúcar	111
7.4.2.2 Mapa de produtividade da cana-de-açúcar	112
7.4.3 Correlação entre atributos físicos e químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar	114
7.4.4 Recomendação de aplicação variada de calcário, fósforo e potássio	114
7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	116
7.5.1 Atributos físicos e químicos do solo	116
7.5.2 Avaliação da acurácia dos dados de produtividade da cana-de-açúcar	116
7.5.3 Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar.....	120
7.5.4 Correlação entre atributos físicos e químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar	125
7.5.5 Recomendação de aplicação variada de calcário, fósforo e potássio	129
7.6 CONCLUSÕES	132
8. DISCUSSÃO GERAL	133
8.1 COLETA DE SOLO E ANÁLISE DE SEUS ATRIBUTOS PARA FINS DE MAPEAMENTO	134
8.2 INSTRUMENTAÇÃO DE COLHEDORA PARA FINS DE MAPEAMENTO DO RENDIMENTO DA CULTURA	136
8.3 MAPEAMENTO DO RENDIMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	138
8.4 AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE ATRAVÉS DAS CORRELAÇÕES DOS ATRIBUTOS DO SOLO COM O RENDIMENTO DA CULTURA	139
9. CONCLUSÕES GERAIS	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais etapas desenvolvidas na pesquisa e proposta de artigos científicos a serem enviados para publicação.....	3
Figura 2. Localização da área de estudo (município de Araras) no estado de São Paulo.	19
Figura 3. Estágio da cultura da cana-de-açúcar na área de estudo: a) um mês após o segundo corte da cana e b) mês da terceira colheita.	20
Figura 4. Média mensal de distribuição de chuvas para a cidade de Araras, SP, no ano de 1995 a 2005. Fonte: Usina São João.....	21
Figura 5. Distribuição de chuvas para a cidade de Araras, SP, nos anos de 2003 e 2004.....	21
Figura 6. Levantamento planialtimétrico da área de estudo.	22
Figura 7. Estágio da cultura da cana-de-açúcar na área de estudo.	27
Figura 8. Ponteira de cravação do amostrador de solo (dimensões em mm).	28
Figura 9. Amostrador. Dimensões em mm.	28
Figura 10. Amostrador de solo montado nos três pontos do trator.....	29
Figura 11. Grade amostral de 50 x 50 m para amostragem dos atributos físicos e químicos do solo.....	30
Figura 12. Etapas da coleta de solo. a) Numeração e aplicação de uma película de óleo no tubo; b) Colocação do tubo no amostrador; c) Destravamento da sonda para posição vertical; d) Penetração do amostrador no solo; e) Outra vista da penetração do amostrador no solo; f) Retirada do tubo com solo do amostrador e colocação da tampa de vedação do tubo.	31
Figura 13. Determinação da resistência do solo à penetração.....	33
Figura 14. Coleta de solo com trado.....	34
Figura 15. Equipamento utilizado para avaliar a resistência a penetração do solo: (a) Penetrômetro DLG, (b) detalhe do penetrômetro com o GPS acoplado.	35
Figura 16. Detalhes do procedimento de remoção de amostras de solo (“Saca amostra”).	36
Figura 17. Amostras referentes às profundidades 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm.....	36
Figura 18. Pesagem das camadas de solo.....	37
Figura 19. Remoção da superficial lateral das secções de solo para evitar uma possível contaminação com óleo.	37
Figura 20. Mapa representando a área de estudo com os 10% dos dados retirados.....	41
Figura 21. Semivariograma do atributo argila relativo às camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm.....	46
Figura 22. Semivariograma do atributo cálcio relativo às camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm	47
Figura 23. Semivariograma do atributo potássio, fósforo e zinco relativo à camada 0-10 cm.	48
Figura 24. Mapas da variabilidade espacial do atributo fósforo (P) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).....	55
Figura 25. Mapas da variabilidade espacial do potássio (K) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).	56
Figura 26. Mapas da variabilidade espacial do índice de saturação em base (V%) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).....	57
Figura 27. Mapas da distribuição espacial da granulometria, densidade e acidez relativos a camada 0-10 cm (IAC, 1996).	58

Figura 28. Mapas da distribuição espacial do carbono (C), nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), cobre (Cu) relativos à camada 0-10 cm (IAC, 1996).	59
Figura 29 Mapas de resistência a penetração (MPa) na camada de 20-30 cm.	60
Figura 30. Mapas da variabilidade espacial do atributo fósforo (P) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.	64
Figura 31. Mapas da variabilidade espacial do potássio (K) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.	65
Figura 32. Mapas da variabilidade espacial do índice de saturação em base (V%) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.	65
Figura 33. Mapa de resistência à penetração para a camada 10-20 cm do solo.	66
Figura 34. Esquema do DGPS utilizado.	71
Figura 35. Pesagem do transbordo utilizando células e carga.	72
Figura 36. Pontos georeferenciados dos transbordos carregados.	73
Figura 37. Pontos marcados no mapa de linhas de sulcação da área de estudo.	74
Figura 38. Pontos georeferenciados relativos aos transbordos sob as subáreas criadas dentro da área de estudo.	74
Figura 39. Pontos gerados com a mesma produtividade para cada subárea criada.	75
Figura 40. Mapa de produtividade da área de estudo.	77
Figura 41. Colhedora adaptada com o sistema de mapeamento de produtividade.	85
Figura 42. Vista superior da balança sem a placa de pesagem montada, mostrando a disposição das células.	86
Figura 43. Dispositivo para determinação da pesagem da cana-de-açúcar colhida instalada no elevador da colhedora e localização da caixa de alumínio contendo o circuito eletrônico montado na parte de baixo do sistema de pesagem.	87
Figura 44. Localização do sensor magnético utilizado para medir a rotação do elevador da colhedora. a) vista geral do elevador e localização do sensor, b) vista detalhada do sensor.	88
Figura 45. Esquema do circuito elétrico do conversor frequência/tensão.	89
Figura 46. Sensor de velocidade SV18GPS.	90
Figura 47. a) Circuito eletrônico b) Caixa de alumínio que acondiciona o circuito eletrônico.	92
Figura 48. Vista dos equipamentos montados na cabina da colhedora: (a) monitor de colheita, (b) placa de aquisição de dados e (c) a interface conversor Frequência/Tensão.	93
Figura 49. Imagem da tela final do programa de gerenciamento do SIMPROCANA.	95
Figura 50. Unidade hidrostática utilizada para o acionamento do elevador da colhedora em laboratório.	98
Figura 51. Calibração do sensor de velocidade da colhedora em condições de campo.	99
Figura 52. Ensaio de calibração da balança em condições de laboratório.	100
Figura 53. Carga dos transbordos sendo transferida para o “rodotrem”.	101
Figura 54. Curva de calibração do sensor de ângulo.	102
Figura 55. Curva de calibração do sensor de velocidade SV18GPS.	103
Figura 56. Curvas de calibração das células de carga utilizadas nos ensaios.	104
Figura 57. Curva de calibração do sensor de peso obtido em laboratório.	105
Figura 58. Colhedora em operação e transferência da cana para o conjunto de transbordos.	111
Figura 59. Pesagem do transbordo utilizando células e carga.	112
Figura 60. Produtividade ($t\ ha^{-1}$) da cana-de-açúcar nos locais georeferenciados relativos aos dados filtrados.	120
Figura 61. Produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) após a aplicação do fator de correção.	121

Figura 62. Mapa de produtividade sem a aplicação do fator de correção por krigagem.....	122
Figura 63. Mapa de produtividade após a aplicação do fator de correção por krigagem.	122
Figura 64. Mapa de produtividade após a aplicação do fator de correção por IDW.....	123
Figura 65. Comparação entre as validações cruzada utilizada para comparar os modelos gerados pelo método IDW e da krigagem.	124
Figura 66. Histograma dos dados de produtividade em t ha ⁻¹ de cana-de-açúcar.	125
Figura 67. Mapa de prescrição de fósforo (P ₂ O ₅) para o talhão de 42 ha.	130
Figura 68. Mapa de prescrição de potássio (K ₂ O) para o talhão de 42 ha.....	130
Figura 69. Diagrama em blocos contendo as principais atividades desta pesquisa.....	133
Figura 70. Diagrama em blocos das atividades realizadas para a geração dos mapas dos atributos físicos e químicos do solo.....	134
Figura 71. Diagrama em blocos das atividades realizadas para a instrumentação da colhedora.	136
Figura 72. Diagrama em blocos das atividades realizadas para o mapeamento da produtividade.	138
Figura 73. Esquema mostrando a interligação varias atividades realizadas na pesquisa.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva para os 100% dos dados nas camadas amostradas.....	42
Tabela 2. Estatística descritiva clássica dos conjuntos 90% e 10% de dados	44
Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas da densidade, granulometria, acidez e macronutrientes do solo.	49
Tabela 4. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas do carbono, nitrogênio e micronutrientes do solo.	50
Tabela 5. Erro médio e raiz quadrada do erro médio obtidos pelo procedimento de validação externa para densidade, granulometria, acidez e macronutrientes do solo.....	52
Tabela 6. Erro médio e raiz quadrada do erro médio obtidos pelo procedimento de validação externa para carbono, nitrogênio e micronutrientes do solo.....	53
Tabela 7. Estatística descritiva para os 100% dos dados nas camadas amostradas.....	62
Tabela 8. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas da segunda amostragem. .	63
Tabela 9. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para as camadas 0 a 10 e 10 a 20 cm.....	79
Tabela 10. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para as camadas 20 a 30 cm.	80
Tabela 11. Possíveis combinações de “status” da colhedora que podem ocorrer no campo.....	96
Tabela 12. Comparação dos pesos medidos do caminhão com os do sistema desenvolvido..	106
Tabela 13. Tabela de recomendação de P_2O_5 e K_2O para cultura da cana-de-açúcar.	116
Tabela 14. Amostra dos conjuntos analisados do ensaio para avaliação da acurácia do sistema.	117
Tabela 15. Parâmetros estatísticos calculados para o fator de correção (FC) obtidos no ensaio de avaliação da acurácia dos dados de produtividade.	118
Tabela 16. Comparação dos pesos obtidos pela pesagem do caminhão na balança da usina com os do transbordo pesado em campo, utilizando-se as plataformas de pesagem.	119
Tabela 17. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para a camada 0 a 10 cm.	127
Tabela 18. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para a camada 10 a 20 cm.	128
Tabela 19. Dosagens calculadas para aplicação de calcário, fósforo e potássio em taxas fixas e variáveis em 42 ha.	129

Agricultura de precisão em cana-de-açúcar: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo

RESUMO

A presente pesquisa visa instrumentar uma colhedora de cana-de-açúcar para obtenção de mapas de produtividade da cultura e ao mesmo tempo, avaliar e correlacionar os atributos físicos e químicos do solo com os dados de produtividade. Os mapas foram elaborados para uma área de 42 ha da Usina São João Açúcar e Álcool localizada em Araras, SP. O sistema de mapeamento de produtividade de cana-de-açúcar desenvolvido (SIMPROCANA) utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso do material colhido e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um Sistema de Posicionamento Global (GPS) instalado na colhedora, permitem, com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica – SIG, a elaboração de mapa digital que representa a superfície de produção para a área colhida. Este sistema foi testado em laboratório e em campo. O SIMPROCANA representou satisfatoriamente a variabilidade espacial da produtividade da cultura. O peso obtido por esse sistema, comparado com o da carga de cana na balança da usina, apresentou um erro médio de 0,96% com um máximo de 6,4%. O resultado deixa de ser satisfatório quando se compara o peso obtido pelo SIMPROCANA com aquele proveniente do transbordo pesado no campo. O erro médio associado nesse caso é aproximadamente dez vezes maior quando se faz a associação com o peso na balança da usina. Os mapas dos atributos físicos e químicos do solo (granulometria, macro e micronutrientes, acidez, densidade e resistência à penetração) foram confeccionados com base em duas amostragens em anos consecutivos. Na primeira, com o auxílio de um veículo amostrador, foram coletadas 170 amostras na área de 42 ha em uma malha regular de 50 x 50 m. Na segunda, coletou-se 49 amostras em malha de 100 x 100 m definida em base nos alcances máximos obtidos pela análise geoestatística da primeira amostragem. Os resultados da primeira amostragem foram correlacionados com a produtividade da cana-de-açúcar obtida pela pesagem dos transbordos em campo. Esse método alternativo de avaliação permitiu a utilização dos resultados da primeira amostragem, uma vez que a colhedora não estava devidamente instrumentada. Os dados da segunda amostragem foram relacionados ao mapa de produtividade obtido pelo

SIMPROCANA. Os resultados das análises físicas e químicas usados para a construção dos modelos dos semivariogramas se ajustaram melhor para a malha de 50 x 50 m do que à de 100 x 100 m. As correlações entre produtividade e atributos do solo apresentaram valores baixos. Os maiores índices ocorreram para as variáveis cobre (0,55), altitude (-0,47%) e teor de argila (0,51%). Apesar dessas baixas correlações, foi possível recomendar uma aplicação variada de insumos baseando-se exclusivamente nas informações dos atributos químicos do solo. Simulações mostraram que os custos de aplicação em taxa variada de fertilizantes fosfatados e potássicos são praticamente 50% menores do que o valor calculado para a taxa fixa. Em relação à calagem não houve variação significativa nos custos de aplicação do calcário pelas duas maneiras.

Precision Agriculture in Sugar cane: instrumentation of a harvester, yield and soil attributes mapping

ABSTRACT

The present research aims to instrument a sugarcane harvester in order to obtain the crop yield maps and, at the same time, evaluate and correlate the physical and chemical attributes of the soil using the yield data. In order to obtain these maps, an area measuring 42 ha located at São João Sugar and Alcohol Mill in Araras, São Paulo, Brazil. The yield mapping system of sugarcane crop developed (SIMPROCANA) uses load cells as an instrument to weighing the harvested material and it is capable to measure the flow passing by the matting before being launched to the transport vehicle. These data, together with the information obtained by a Global Positioning System (GPS) installed on the harvester, allow the elaboration of a digital map with the help of a Geographical Information System - GIS that represents the production on the surface for the harvested area. This system was tested under laboratory and field conditions. SIMPROCANA represented satisfactorily the spatial variability of the crop yield. The weight obtained by this system compared with that of sugarcane load in a mill's scale presented an average error of 0.96%, with a maximum of 6.4%. The result is not satisfactory anymore when it compares the weight obtained by using SIMPROCANA with that from the transportation vehicle weighed in the field. The average error associated in this case is around ten fold higher, when the association with the weight obtained in the mill's scale is performed. In relation to the making of map of physical and chemical attributes of soil (granulometry, macro and micronutrients, acidity, density, and resistance to penetration), two samplings were made in consecutive years. In the first sampling, 170 samples were collected in a 42 ha area in a regular grid of 50 x 50 m, helped by a sampler vehicle. In the second one, 49 samples in a 100 x 100 m grid defined by the maximum reaching obtained by geostatistics analysis performed at the first sampling. The results of the first sampling were correlated with the sugarcane yield obtained by means of weighing the transport vehicle in the field. This alternative method allowed the using of the results from the first sampling once the harvester was not properly instrumented. The data from the second sampling were related to the yield mapping obtained by using SIMPROCANA. The results of the physical and chemical analyses used for the construction

of semivariograms models adjusted better at the 50 x 50 m grid when compared to that of 100 x 100 m. the correlations between the yield and the soil attributes presented lower values. The higher indexes occurred for the variable altitudes (- 0.47%), clay rate (0.51%), and copper (0.55). Despite these low correlations, it was possible to recommend a varied rate application of inputs based exclusively on the information obtained from the chemical attributes of the soil. Simulation tests showed that the application costs under a varied rate of phosphated and potash fertilizers are practically half of the value calculated for a fixed rate. In relation to the liming, there was not significative variation in the prices of lime application spread by both methods.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda nacional e internacional de álcool para adição à gasolina para motores de combustão condiciona o aumento da área de produção de cana-de-açúcar no Brasil. Áreas atualmente utilizadas com pastagem estão sendo substituídas pelo cultivo da cana-de-açúcar a fim de atender as necessidades de álcool do mercado. Modernas usinas estão sendo instaladas em todo o Brasil e mais notadamente no noroeste do Estado de São Paulo.

É preciso, no entanto, que essas novas áreas de plantio sejam iniciadas com tecnologias mais modernas que tragam não só maiores retornos financeiros ao produtor mas também causem menores impactos no ambiente. A adoção da Agricultura de Precisão se ajusta muito bem a esses propósitos, porém exige máquinas e equipamentos específicos, além de informações precisas sobre a produtividade da cultura e as características do solo.

Para Molin (2001) Agricultura de Precisão é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados. A adoção dessa tecnologia exige um grande número de informações sobre a área em que determinada cultura será implantada. Exemplos de informações necessárias são os mapas dos atributos físicos e químicos do solo e da produtividade da cultura.

Tais informações podem ser obtidas com o uso do GPS, que permite georreferenciar os dados coletados do emprego do Sistema de Informação Geográfica (SIG), responsável pelo tratamento dos dados referenciados espacialmente e de colhedoras adaptadas com monitores e sensores capazes de medir a produtividade de uma cultura.

O agrossistema cana-de-açúcar foi selecionado para estudo nessa pesquisa por possuir grande expressão econômica no Brasil, além de ser pouco explorado pelas técnicas de Agricultura de Precisão. Com aproximadamente 5,57 milhões de hectares plantados e uma safra anual de cerca de 354 milhões de toneladas, o país é o maior produtor mundial de cana. A produção em 2003/2004 atingiu 24,8 milhões de toneladas de açúcar e 14,4 bilhões de litros de álcool. Esse montante movimenta cerca de 12,7 bilhões de reais por ano, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a 2,3% do PIB brasileiro (FAO, 2005; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2005).

A presente pesquisa baseia-se na hipótese de que a variabilidade espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar está relacionada com os atributos físicos e

químicos do solo. O objetivo geral foi instrumentar uma colhedora de cana-de-açúcar para obtenção de mapas de produtividade da cultura e, ao mesmo tempo, avaliar e correlacionar os atributos físicos e químicos do solo com os dados de produtividade.

Para atingir o objetivo foi necessário, inicialmente, aprimorar e otimizar a instrumentação da colhedora de cana-de-açúcar em desenvolvimento no Laboratório de Projetos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP a fim de viabilizar o mapeamento de produtividade da cultura. Em seguida foi desenvolvido um programa gerenciador em Linguagem C para possibilitar o mapeamento de produtividade da cana-de-açúcar. A partir dessas duas etapas pôde-se mapear a produtividade da cana-de-açúcar em uma área de aproximadamente 42ha, utilizando o critério de célula. Em paralelo foi realizada a avaliação da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo. Finalmente, foi possível correlacionar as informações obtidas sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo com as da variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar e topografia, utilizando geoprocessamento para obtenção de mapas de correlação. A Figura 1 esquematiza as principais fases acima descritas e ao mesmo tempo indica o conjunto de atividades que compõem as diversas seções dessa tese. Os resultados e discussões foram divididos em capítulos, os quais constituirão artigos científicos a serem submetidos com vistas a serem publicados em revistas especializadas.

Os capítulos 1, 2 e 3 desta tese referem-se respectivamente a introdução, revisão bibliográfica e a descrição da área que é comum para os demais itens.

O capítulo 4, circundado em vermelho na Figura 1, refere-se ao artigo “Avaliação da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo de uma área de cana-de-açúcar através da aplicação da geoestatística” que deverá ser enviado para a Revista Brasileira de Ciência do Solo.

O capítulo 5 é uma combinação das informações contidas no capítulo 4 com as informações do mapa de produtividade obtido pela pesagem dos transbordos em campo e a correlação dessas duas informações. Este artigo tem como título “Correlação da produtividade da cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo” e será enviado para publicação na Soil and Tillage Research.

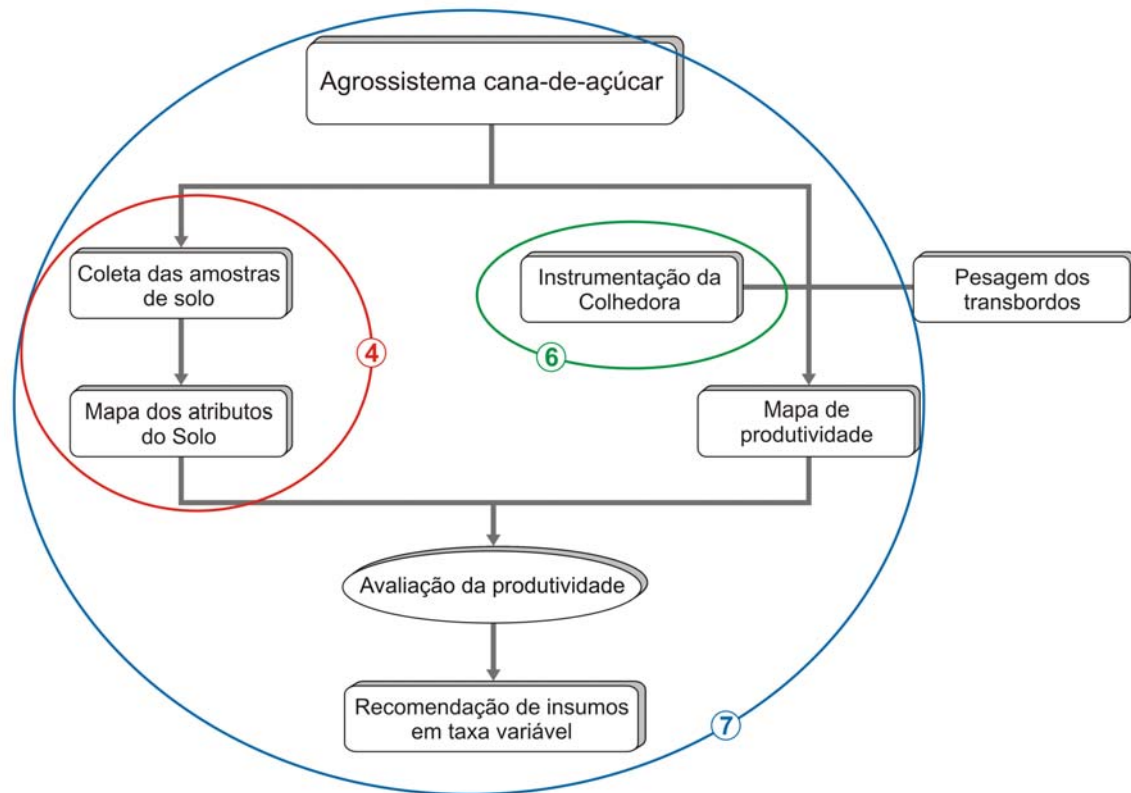


Figura 1. Principais etapas desenvolvidas na pesquisa e proposta de artigos científicos a serem enviados para publicação.

O capítulo 6, circundado em verde na Figura 1, refere-se ao artigo “Desenvolvimento de um monitor de produtividade de cana-de-açúcar” que deverá ser enviado para publicação na Revista Biosystem Engineering. O item 7, circundado em azul na Figura 1, integra todas as atividades dessa pesquisa e constitui o artigo “Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar: bases para recomendação de uma aplicação variada de fósforo, potássio e calcário” preparado para ser enviado para a revista Precision Agriculture.

Finalmente, os capítulos 8 e 9 correspondem, respectivamente, à discussão e à conclusão geral desta tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista a abrangência do assunto tratado, a presente revisão bibliográfica foi dividida em sete partes, de maneira a facilitar a compreensão e a apresentação das informações. A primeira (2.1) aborda, de maneira geral, os conceitos e definições de Agricultura de Precisão. A segunda (2.2) aborda os conceitos e fundamentos da geoestatística. A terceira parte (2.3), menciona algumas aplicações da geoestatística em estudos de propriedades do solo. Na quarta parte (2.4) é apresentado o conceito de mapeamento de produtividade. Na quinta parte (2.5) estão descritos os principais tipos de sensores utilizados para mensurar a produtividade de uma cultura. Na sexta parte (2.6) são apresentados exemplos de utilização de sensores desenvolvidos para o mapeamento de produtividade de cana-de-açúcar. Na última parte (2.7) é discutida a correlação entre produtividade e propriedades físicas e químicas do solo.

2.1 Agricultura de precisão

Linsley & Bauer citados por Goering (1993) apresentaram em 1929, a Circular no. 346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (USA). Nessa circular os autores concluíram que: os requisitos de aplicação variavam bastante para um mesmo talhão em sua necessidade de calcário; e a necessidade de que fossem feitos testes sistemáticos e detalhados no campo, de forma que o calcário pudesse ser aplicado de acordo com a sua necessidade. Essa idéia permaneceu no esquecimento por muitos anos, até o momento em que a disponibilidade de microcomputadores, sensores e sistemas de posicionamento via satélite se tornaram disponíveis a custos acessíveis.

Surgiu desse modo, o conceito de Agricultura de Precisão (AP), o qual vem sendo definido de diferentes maneiras por diversos autores como:

Schueller (1992) definiu a Agricultura de Precisão como um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas em cada ponto da lavoura, tendo em vista a desuniformidade intrínseca dos solos.

Para Goering (1993) a Agricultura de Precisão tem como meta final aplicar sementes, fertilizantes, e outros insumos variavelmente em cada talhão, nas taxas adequadas à produtividade do solo em cada ponto do talhão.

Segundo Searcy (1995) a Agricultura de Precisão é a tecnologia que possibilita modular a aplicação dos insumos agrícolas numa base pontual em resposta a necessidades altamente localizadas das plantas.

Rawlins (1996) diz que a Agricultura de Precisão é o conceito de casar os insumos com a capacidade de produção.

De acordo com Blacmore & Larscheid (1997) os conceitos da Agricultura de Precisão estão relacionados à variabilidade da produtividade e dos atributos do solo e das plantas. Segundo estes autores, existem três tipos de variabilidade: espacial, temporal e preditiva. A variabilidade espacial é observada ao longo do campo e pode ser facilmente constatada em qualquer mapa de produtividade ou fertilidade. A variabilidade temporal é observada quando se comparam mapas de produtividade de vários anos; a variabilidade preditiva é a diferença entre a previsão de algum fator e o que realmente aconteceu. Os autores relatam que, para gerenciar cada uma das variabilidades é necessário entendê-las e sobretudo, mensurá-las.

Em uma visão mais voltada para os equipamentos, Clark & McGuckin (1996) e Strauss et al. (1998) dizem que a Agricultura de Precisão envolve sistemas automáticos, basicamente compostos por microcontroladores, sensores e atuadores acoplados ao implemento agrícola pré-existente e interligado ao Sistema de Posicionamento Global “Global Positioning System”.

Para Molin (2001) Agricultura de Precisão é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados.

Outro fato que impulsionou a utilização desse conceito, foi a crescente preocupação com fatores ambientais, pois, com essa técnica, as aplicações de produtos químicos são efetuadas de modo a satisfazer a necessidade de cada ponto do talhão e com isso, diminuir a probabilidade desses produtos serem lixiviados e contaminarem o ambiente (BLACKMER & SCHEPERS, 1996; OSTERGAARD, 1997; BOUMA, 1998).

Balastreire (1998b) apresenta o potencial de utilização dos conceitos de AP na cultura de cana-de-açúcar e ressalta entre os principais benefícios: a) possibilitar a redução da poluição ambiental, tema extremamente importante nos dias de hoje, onde cada vez mais se busca uma agricultura sustentável; b) proporcionar benefícios econômicos, onde as reduções do custo final do produto podem ser obtidas retirando-se os insumos de pontos de menor

potencial de produção e redirecionando-os para pontos de maior potencial; e c) melhorar a produtividade, com aumento desta e/ou aumento da quantidade de açúcar disponível na cana. O mesmo autor ressalta que os conceitos de AP na cultura de cana-de-açúcar se dividem em quatro frentes:

1. Mapeamento de solo – este irá indicar o potencial de fertilidade do solo, o que permitirá o estabelecimento de estratégias de aplicação de fertilizantes;
2. Mapeamento da cultura – que irá permitir a obtenção de mapas georeferenciados dos talhões e da cultura em seus diversos estágios;
3. Mapeamento da colheita – utilizando-se um sensor de fluxo de massa pode-se obter um mapa de produtividade de cada célula dentro do talhão. Com o georeferenciamento tem-se a exata localização de cada célula, então, pode-se verificar em loco qual foi o motivo da baixa produtividade;
4. Aplicação localizada de insumos – a decisão sobre o melhor método de gerenciamento da área pode ser feito por meio de programas computacionais específicos desenvolvidos para a agricultura, que fornecem mapas de aplicação localizada de insumos. Com o auxílio de equipamentos especialmente instrumentados para o controle da aplicação, pode-se aplicar a quantidade requerida em cada célula para se utilizar o seu máximo potencial de produtividade.

2.2 Geoestatística: conceitos e fundamentos gerais

Segundo Vieira (1995) quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, deve-se utilizar um enfoque estatístico relativamente novo: a geoestatística. Por estatística clássica entende-se aquela que utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias (OLIVIER & WEBSTER, 1991; WEBSTER, 2001; GASTON et al., 2001).

O conjunto de ferramentas estatísticas para o estudo da variabilidade espacial de uma propriedade qualquer, denominado geoestatística, tem como base a teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1971). De acordo com esse autor, a geoestatística é a aplicação do formalismo das funções aleatórias para o reconhecimento e a estimativa de fenômenos naturais.

Esses dois ramos da estatística têm validade de aplicação em condições perfeitamente distintas (ISAAKS & SRIVASTAVA 1989; RIBEIRO JÚNIOR, 1995; WEBSTER, 2000; WEBSTER, 2001). Para se determinar qual das duas deve ser usada em cada caso, utiliza-se o semivariograma, que expressa a dependência espacial entre as amostras (CRESSIE, 1985; JOURNAL, 1989; BERNOUX et al., 1998; GONÇALVES et al., 1999; CASTRIGNANO et al., 2000; YANAI et al., 2001).

Segundo Goovaerts (1998) embora os pontos em um semivariograma experimental bem estimado se apresentem de forma ainda irregular, usualmente é possível ajustar funções simples a eles. Segundo Viana da Mata et al. (1999) um modelo matemático a ser ajustado ao semivariograma precisa incluir basicamente dois parâmetros: um intercepto ou efeito pepita, um patamar ou “sill”, atingido após uma distância correspondente ao alcance. Além disso, a forma da curva deve se ajustar aos pontos experimentais na região de crescimento da função, ou seja, para h entre zero e o alcance.

Escolher o modelo mais adequado não é um procedimento automático (RIBEIRO JÚNIOR, 1995; VIEIRA, 1995; GONÇALVES, 1997; DEGGLE & RIBEIRO JÚNIOR, 2000; GASTON et al., 2001). Em geoestatística é comum o ajuste visual do modelo selecionado aos pontos experimentais, o que carece de sustentação estatística. De acordo com McBratney & Webster (1986) e Webster (2000) ajustes normalmente são feitos pelo método da minimização do quadrado dos desvios, assumindo normalidade e independência dos resíduos e homogeneidade de variâncias.

Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, pelo método denominado krigagem (GOOVAERTS, 1999; DEGGLE & RIBEIRO JÚNIOR, 2000; YANAI et al., 2001). A krigagem faz uso de um interpolador linear não tendencioso e de variância mínima que assegura a melhor estimativa. Este estimador tem como base os dados amostrais da variável regionalizada e as propriedades estruturais do semivariograma obtido a partir destes dados (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Ribeiro Júnior (1995) a dependência entre duas propriedades espaciais pode ser expressa pelo semivariograma cruzado, e se ele existir, o método chamado co-krigagem pode ser utilizado para estimar a propriedade mais difícil de se medir, utilizando-se os dados de ambas. A construção de mapas de contornos (isolinhas) associados a mapas de

erros/desvios e o delineamento de espaçamento e disposição ótima de amostras no campo, são outros aplicativos imediatos.

2.3 Aplicação da geoestatística em estudos de propriedades do solo

As técnicas estatísticas empregadas na ciência agrícola, tradicionalmente pressupõem estacionaridade e independência dos dados. Propriedades do solo, no entanto, podem apresentar dependência espacial em escalas que variam da ordem de poucos metros a alguns quilômetros (WHITE et al. 1997; CASTRIGNANO et al., 2000; YANG et al., 2001). Além disso, é importante constatar que o solo é resultante da ação de alguns fatores que atuam em larga escala, cujo efeito é alterado por fatores que atuam em escalas menores; em diferentes níveis de superposição de efeitos, o que proporciona um caráter hierárquico para a estrutura de variação das propriedades no espaço (GONÇALVES, 1997; GOOVAERTS, 1999; CHEVALLIER, 2000).

As propriedades do solo, além de variar no espaço, podem variar no tempo, para uma dada posição no espaço (BERNOUX, 1998). Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades que em outras (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998; SLOT et al., 2001).

A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão.

Mapa e Kumaragamage (1996) estudaram a variabilidade espacial de parâmetros físicos e químicos de um solo tropical, usando uma malha com espaçamento de 5 m e próximo ao centro da mesma tomaram uma “janela”, correspondente a uma quadrícula de 5 x 5 m e amostraram intensamente a cada 1 m. Constataram que o pH, apesar de apresentar o menor coeficiente de variação ajustou-se a uma distribuição log-normal. O pH não apresentou semivariograma estruturado. O efeito pepita foi sempre superior a 50% da variabilidade total. O ajuste dos modelos foi feito por regressão, minimizando a soma de quadrados dos desvios. Os autores sugerem manejo diferenciado nas subáreas, de acordo com os mapas de valores das propriedades, obtidos por meio de krigagem em blocos.

Gonçalves (1997) mediu o pH, matéria orgânica, acidez trocável, P disponível e bases trocáveis em uma malha de espaçamento variável, de forma a abordar as variações em micro e

em macro escala. Embora os resultados demonstrem baixa variabilidade do pH em relação às outras propriedades, o autor enfatiza que o conhecimento do padrão de variabilidade permite a identificação de padrões de amostragem adequados para pesquisas futuras.

O trabalho de Goovaerts (1999) relativo ao “o estado da arte” da geoestatística, descreve as principais aplicações dessa técnica em estudos de ciência do solo. Dentre os vários assuntos tratados, o autor discute sobre os diferentes métodos de interpolação por krigagem e afirma que uma das maiores contribuições da geoestatística está relacionada à avaliação da incerteza na estimativa de valores não amostrados.

A pesquisa de Stolt et al. (2001) aponta que em solos inundados de Virginia (EUA), a variabilidade espacial do carbono orgânico do solo está relacionada principalmente com a natureza estratificada dos solos aluviais e seu acúmulo de matéria orgânica. Além do carbono orgânico do solo, outras variáveis como pH e tamanho de partículas foram analisados geoestatisticamente. Os resultados mostram que a elevação do terreno foi o fator de menor influência na variabilidade espacial do carbono, mas interferiu significativamente na distribuição do tamanho das partículas do solo. Os autores concluem o trabalho ressaltando a complexidade dos processos que regem a variabilidade espacial do carbono em solos inundados.

Yang et al. (2001) aplicaram ácido fosfórico como estratégia para correção de solos contaminados com chumbo. Sabe-se que o pH do solo influencia diretamente na disponibilidade desse elemento. Por tal motivo, os autores necessitaram conhecer a variabilidade espacial do pH em micro escala e compararam a análise de variância convencional com a espacial. O pH do solo foi medido utilizando micro eletrodos em intervalos de 1 cm, no sentido vertical e horizontal, em amostras de terra com dimensão de 10 x 10 x 2,5 cm. Os resultados desta pesquisa mostraram que a adição de ácido fosfórico propiciou a diminuição significativa do pH do solo e aumentou a variabilidade espacial total na zona medida. Os autores verificaram que a variabilidade espacial do pH na direção vertical diferiu significativamente, mas isso não ocorreu na direção horizontal.

Yanai et al. (2001) determinaram pH, capacidade de troca de cátions, carbono total, nitrogênio total, relação C/N, fósforo disponível, N inorgânico, N mineralizável, Ca, Mg, K e Na em 100 amostras de solo coletadas em uma área de 50 x 100 m cultivada com arroz. Análise geoestatística indicou moderada a alta dependência espacial para as propriedades do

solo exceto, para o conteúdo de nitrogênio inorgânico. Dependência espacial de 20-30 m foi encontrada para pH, capacidade de troca de cátions, carbono total, nitrogênio total e Na. Uma dependência espacial de 40 m foi observada para fósforo disponível, N mineralizável, Ca e Mg. Já, a relação C/N e conteúdo de K apresentaram dependência espacial com alcance de 50-60 m. Análise multivariada em combinação com geoestatística possibilitou explicar 65% da variação não-aleatória ou da estrutura espacial como fatores determinantes para a obtenção da produção dos grãos de arroz.

Barbieri et al. (2002) estudaram a variabilidade espacial de fósforo, potássio e soma de bases em área sob cultivo de cana-de-açúcar. Por meio da geoestatística os semivariogramas ajustaram-se ao modelo exponencial para as variáveis fósforo e potássio, e esférico para a soma de bases, com valores de alcance de 711 m, 743 m, e 587 m para o fósforo, potássio e soma de bases, respectivamente. A partir dessas informações os autores sugerem que em futuras amostragens para avaliação de propriedades de solo em condições semelhantes, utilize-se malha suficiente para cobrir toda a área de interesse, com o intervalo de amostragem igual ao alcance da dependência espacial, o que estaria associando a menor esforço de amostragem, com maior representatividade, além de permitir a interpolação entre pontos amostrais e a elaboração de mapa sobre toda a área. Os resultados indicam que a distância entre pontos de amostragem do solo para se conhecer a variabilidade espacial dos teores de fósforo e potássio, deve ser da ordem de 743 m e para a soma de bases 587 m, respectivamente. Finalmente, concluem que todos os atributos estudados apresentaram grau da dependência espacial moderada.

A variabilidade espacial de propriedades do solo e a distribuição espacial de plantas daninhas no delta do Mississippi (EUA), foram estudadas através da utilização da geoestatística por Gaston et al. (2001). Amostras de solos foram coletadas através de uma malha regular de 60 m em uma área de 50 ha. Determinaram-se pH, carbono orgânico, textura, umidade e atividade microbiana do solo. A atividade microbiana mostrou limitada dependência espacial. Já com relação ao pH, carbono orgânico e textura, os semivariogramas foram bem descritos com modelos esféricos. Apesar de apresentar baixo alcance (< 60 m) a variabilidade foi alta. A densidade de plantas daninhas foi significativamente ($p < 0,05$) mais alta em solos com elevado teor de carbono orgânico e textura fina. Área com baixo teor de carbono e textura mais grossa não apresentaram infestação por plantas daninhas. Os autores

concluem sugerindo aplicações localizadas e taxas variadas de herbicidas para o controle de plantas daninhas, de acordo com a variabilidade espacial encontrada.

Do que foi apresentado pode-se sugerir que a quantificação da variabilidade espacial é útil por dois motivos: O primeiro é que o conhecimento dos erros associados ao modelo permite avaliar a qualidade dos resultados, definindo se estes atendem ao esperado, e se a qualidade é superior à necessária. Neste caso, nos próximos trabalhos, pode-se adotar uma amostragem menos intensa, reduzindo custos. Por outro lado, a qualidade pode ser inferior à necessária. Neste caso, talvez seja necessário coletar mais dados, calibrar melhor o modelo, usar melhor o modelo, trabalhar em uma resolução espacial diferente ou até mesmo, escolher melhor um método de predição (VIEIRA, 1995; RIBEIRO JUNIOR, 1995; BERNOUX, 1998; GASTON et al., 2001; YANG et al. 2001). O segundo é que o mapeamento dos atributos em questão, para agricultura de precisão, é a base para se gerar mapas de prescrição.

Tomando como referência este segundo motivo, Goering (1993) e Goering & Hans (1993) partem do princípio de que, levando-se em conta a variabilidade natural dos fatores de produção, pode-se aplicar apenas as quantidades efetivamente necessárias em cada ponto e que, portanto, as técnicas de aplicação localizada de insumos se tornam muito importantes para uma agricultura rentável. Este conceito é evidenciado pelo trabalho de Borgelt (1994), o qual depois de amostrar o pH do solo de uma área de 8,8 ha, concluiu que sem a utilização da técnica de aplicação localizada, 9 a 12% dessa área receberia uma quantidade de calcário acima da recomendada e 37 a 41% receberia uma quantidade abaixo da recomendada.

2.4 Mapeamento de produtividade

De acordo com Han et al. (1994) o mapeamento da produtividade é um importante componente para a Agricultura de Precisão, pois identifica e quantifica a variabilidade espacial da produtividade das culturas e auxilia os processos de gerenciamento localizado.

Molin (2001) descreve que as atividades relacionadas à Agricultura de Precisão compõem um ciclo fechado de tarefas e que este ciclo tem como ponto de partida a fase de mapeamento de produtividade. Segundo o autor, o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras.

Balastreire (1998a) considera que a fase de mapeamento de produtividade é a que apresenta maior facilidade de execução devido ao grande número de pesquisas já realizadas

nos EUA e Europa e devido às diversas opções de equipamentos existentes, principalmente, para cultura de grãos.

Morgan & Ess (2003) relatam a importância de se desenvolver monitores de produtividade para outras culturas como tomate, beterraba, batata, cana-de-açúcar e outras diferentes das de grãos que vêm sendo amplamente estudadas.

De acordo com Han et al. (1994) a área a ser mapeada é dividida em seções menores, denominadas células. As dimensões dessas células devem obedecer a determinados valores, como por exemplo, velocidade e tamanho da colhedora, capacidade de leitura e aquisição de dados do sistema de medição e posicionamento.

2.5 Sensores de produtividade

Diversos autores como Borgelt et al. (1992), Johnson (1996), Molin (2001), Pagnano (2001), Morgan & Ess (2003) descrevem inúmeras técnicas para determinação da produtividade de uma cultura, como: sensores de impacto para medida de fluxo mássico, sensores baseados no peso do produto, sensores ópticos e sensores nucleares. Nos próximos parágrafos será apresentado uma síntese do que é descrito na bibliografia.

Sensores de fluxo mássico por impacto

A massa de grãos que está sendo colhida é determinada indiretamente por meio da medição da força de impacto exercida pelo grão, com velocidade conhecida, ao atingir uma placa ligada a um potenciômetro, instalada na parte superior do elevador de canecas. Com este mesmo princípio de funcionamento, o potenciômetro pode ser substituído por uma célula de carga resistiva acoplada a uma placa/membrana, que ao ser carregada, apresenta uma variação de sua resistência. O rendimento é correlacionado com esta variação na resistência da célula de carga. Os autores citam ainda, que o bom funcionamento destes sensores dependem de diversos fatores como, por exemplo, a velocidade do elevador que deve ser mantida constante ou apresentar um monitoramento para posterior correção dos dados. Outro fator importante é a umidade do grão que deve ser determinada, pois influencia diretamente sobre o volume e peso do material colhido. Outro parâmetro de importância é relacionado com o tipo de grão, que irá influenciar sobre o fluxo do produto, forma e tamanho, densidade, temperatura e ângulo de descarga.

Sensores de peso

O princípio de funcionamento desse tipo de sensor está baseado em uma célula de carga ligada a um braço metálico, o qual suporta o seu próprio peso mais o peso dos grãos passando entre o braço e um rotor. O rotor apóia-se sobre uma placa que, por sua vez, está apoiada sobre o braço de medição. Este braço é pivotado e possui em sua extremidade uma célula de carga capaz de medir a força exercida sobre ele, e com isso, a quantidade de grãos. Segundo os autores, este tipo de equipamento apresenta certa vantagem em relação ao anterior devido ao fato de determinar o peso do produto diretamente. Tal vantagem esbarra no fator custo, pois estes equipamentos mostram-se mais caros que os anteriores.

Sensores ópticos

São sensores que medem o volume de grãos no elevador das colhedoras. O funcionamento dos sensores ópticos consiste em um emissor de luz infravermelha e em um fotosensor. Este fotosensor é usado para detectar a luminosidade e energia radiante e convertê-los em sinal elétrico. Portanto, o sistema mede o tempo de corte de luz pela passagem das taliscas vazias ou carregadas com grãos, gerando o dado de volume. O dado de volume mais a informação da densidade do grão indicada pelo usuário são usadas para o cálculo da massa de grão que passa pelo elevador e, portanto, a vazão de grãos. Segundo os autores, este tipo de equipamento apresenta como desvantagem a sensibilidade à variação da densidade dos grãos e a declividade do terreno, especialmente a inclinação lateral da máquina. Essa inclinação causa uma acomodação dos grãos sobre as taliscas o que gera um corte de luz maior. Para solucionar este problema, é necessária a instalação de um sensor de ângulo para correção do sinal.

Sensores radioativos

Estes sensores utilizam uma fonte radioativa que transmite um feixe de partículas através do elevador de grãos, avaliando a quantidade de partículas que atinge o outro lado do elevador. Quanto maior a quantidade de grãos transportada, menor o número de partículas que passa através do elevador. Uma das vantagens destes sensores é que não necessitam de compensação de umidade, pois o sinal obtido já leva em consideração este parâmetro. Uma desvantagem é o perigo oferecido pela radioatividade, dificultando sua aprovação para o uso em vários países.

2.6 Sensores desenvolvidos para o mapeamento de produtividade de cana-de-açúcar

Os trabalhos mais comuns apresentados sobre agricultura de precisão estão na área de colheita de grãos, onde empresas como John Deere (1998) desenvolveram sensores para medição do desempenho de suas máquinas e dispositivos para auxiliar o operador nas tomadas de decisões. Suas máquinas colhedoras são produzidas com um sistema completo de monitoramento capaz de detectar o rendimento da cultura, com sensores de umidade, sensores de posicionamento, processador de mapas e um aplicativo computacional para geração de mapas de produtividade. Como se pode observar, para as culturas de grãos, os sistemas de monitoramento para a agricultura de precisão encontram-se em estado avançado.

Similarmente, a Case (1999) desenvolveu um sistema de monitoramento de produção de grãos chamado AFS (Advanced Farming Systems), que conta com dois tipos de receptores, sendo que um deles faz automaticamente a conversão diferencial, um monitor de produtividade e umidade que armazena os dados em um cartão PCMCIA, para posterior análise, e ainda um software para confecção de mapas de rendimento.

A Massey Ferguson (AGCO, 1998) começou o desenvolvimento de mapas de produtividade no começo dos anos 80, mas somente em 1991 é que foi lançado o primeiro sistema para esta função, o Fieldstar. Foram feitos vários ensaios com vários agricultores. Esta experiência mostrou que a aplicação de insumos foi reduzida e a produtividade aumentou. No sistema Fieldstar ambas as medições, produtividade e posicionamento, são registradas a cada 1,2 segundos, durante a colheita, fornecendo, neste caso, 785 pontos de referência por ha. Isto poderia ser comparado com outros mapas, como o de propriedades do solo.

Todavia, para as demais culturas que tradicionalmente não são plantadas nestes países, os recursos técnicos para se aplicar a AP ainda não foram totalmente desenvolvidos, como é o caso da cana-de-açúcar. Para a implantação da AP com êxito nestas culturas com características próprias e bem distintas de grãos, é necessário o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de produção específico, que aliado à informação do GPS permitirá, gerar os mapas de produtividade (CERRI & MAGALHÃES, 2003).

Embora não existam ainda monitores de produtividade para cana-de-açúcar disponíveis no mercado, várias pesquisas têm sido realizadas no Brasil e em outras partes do mundo com o intuito de se desenvolver um produto para este fim. Cox et al. (1996) apresentaram um trabalho de desenvolvimento de um sensor de fluxo mássico para a cultura de cana-de-açúcar,

baseado na determinação de pressões hidráulicas, fluxo de óleo e velocidade de deslocamento da máquina. Com os sinais obtidos com estes sensores determinaram a demanda de potência tanto do elevador quanto do picador do produto, relacionando esta quantidade com o fluxo de cana. O erro obtido no rendimento foi de aproximadamente 2%, e apresentou uma relação linear com o rendimento determinado com o uso de caminhões pesados na usina. Cox et al. (1997) verificaram a utilização deste dispositivo no campo, para obtenção de mapas de rendimento para a cultura de cana-de-açúcar. Este sistema de elaboração de mapas de rendimento apresentou erro de 10%. Cox et al. (1997) relata o uso de várias técnicas diretas e indiretas para se medir a quantidade de cana sendo colhida. As técnicas indiretas envolvem a medição de pressões e demanda de potência em vários pontos da colhedora. Embora os autores não apresentem detalhes de como estes sensores funcionam, os resultados apresentados mostram que os mesmos têm uma boa precisão. Ainda segundo o autor, o invento seria patenteado na Austrália.

No subsistema de colheita mecanizada, Pierossi & Hassuani (1997) na tentativa de produzir mapas de rendimento montaram sobre quatro células de carga de compressão, uma caçamba de balança superior, permitindo, desta forma, a leitura da carga total da caçamba, independente da distribuição desta em seu interior. Saraiva et al. (1999) desenvolveram um dispositivo dinâmico nas carregadoras de cana inteira, com o objetivo de obter a quantidade de cana sendo carregada e posta no caminhão. Durante os testes executados o sistema apresentou altas oscilações na obtenção da produtividade. Estes erros ocorreram durante o movimento do braço mecânico da carregadora quando levantava o feixe de cana para depositá-lo no veículo de carga, fato explicado pelas perturbações e sobrecargas instantâneas no braço da carregadora. Caso o erro permanecesse constante, seria uma alternativa de obter dados de peso para a geração de mapas de produtividade de cana-de-açúcar inteira.

Wendte et al. (2001) publicaram nos Estados Unidos a patente sob o número US6272819, onde descrevem um monitor de produtividade para ser adaptado às colhedoras de cana-de-açúcar. O equipamento consiste em um sensor de peso instantâneo e em uma unidade de controle. O sensor de peso é composto de um transdutor de pressão instalado no motor hidráulico do elevador e um transdutor de torque colocado após o término da unidade elevadora o qual é o responsável por gerar um sinal elétrico proporcional à quantidade de cana-de-açúcar sendo transferida ao veículo de transbordo. O monitor de controle recebe o

sinal deste sensor e calcula a quantidade de cana que está sendo colhida. Como transdutor os autores utilizam um sensor de pressão no motor hidráulico do elevador, que gera um sinal proporcional à pressão hidráulica aplicada ao motor, e um sensor de torque na árvore do motor, ou um prato sensível ao impacto dos rebolos de cana que são lançados contra ele antes de serem transferidos para o veículo de transbordo. Um equipamento de GPS registra a localização da colhedora na área sendo colhida.

Pagnano & Magalhães (2001) desenvolveram um sistema automático de medição da produtividade de cana-de-açúcar quando colhida por colhedoras autopropelidas. O sistema utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo, os quais, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem a elaboração de um mapa digital que representa uma superfície de produção para a área colhida. Esse sistema foi testado em laboratório e em campo nas safras de 2000 e 2001. O erro observado nos ensaios de laboratório oscilou entre um mínimo de 0,70% e um máximo de 2,71 % nos ensaios onde simulou-se uma massa constante, e de 0,35 % a 4,02 % nos ensaios onde se utilizou a passagem de massas conhecidas sobre o elevador. Nos ensaios de campo feitos durante a safra de 2000 na Usina Santa Adélia localizada na cidade de Jaboticabal, SP, o sistema automático de medição (SAM) proposto apresentou, no primeiro talhão colhido, uma diferença de 12,5 % comparado à pesagem dos caminhões na usina. No segundo talhão, o erro do SAM, não pôde ser avaliado em relação à massa medida pela usina, uma vez que houve perda de dados durante a colheita, mas pôde-se fazer uma análise linha a linha e compará-la às massas medidas por uma carreta instrumentada pertencente à COPERSUCAR. O erro apresentado ficou entre 0,38 % e 28,66 %, onde os maiores valores foram atribuídos a problemas operacionais, como por exemplo, início e término da aquisição no meio das linhas. Os ensaios realizados na Usina Cresciumal, na safra de 2001, apresentaram erro máximo de 5,08 % comparados aos caminhões pesados na usina. Portanto, concluiu-se que o sistema proposto atende às expectativas do projeto.

Benjamin (2002) desenvolveu e testou um monitor de rendimento de cana-de-açúcar durante as safras 1999 e 2000. O sistema foi montado em uma colhedora CAMECO CH 2500, ano 1997. O sistema consiste em uma balança, um sistema de aquisição de dados e um DGPS. A balança consistia em um prato de pesagem apoiado por células de carga. A célula de carga

foi montada em uma caixa protetora fixada no elevador da colhedora. A balança montada no chão do elevador registrava medidas instantâneas de produtividade de cana-de-açúcar. Um vagão equipado com um sistema de pesagem foi usado para cada teste como padrão. Foram feitos testes com diferentes níveis de maturidade de cana, variedade, duração de seção e taxa de fluxo. Para cada teste, se comparou as leituras obtidas pela balança com as medidas pelo vagão. O sensor de rendimento predisse a produtividade da cana-de-açúcar com uma inclinação de 0,900 e um R^2 de 0,966. A média de erro da balança foi de 11,05%. Os resultados também mostraram que as diferentes variedades de cana tiveram um efeito nas leituras de balança, mas a maturidade da cana, duração de seção e a taxa de fluxo não tiveram efeito significativo.

Molin et al. (2003) avaliaram a regularidade do peso das cargas realizadas por carregadoras mecânicas de cana-de-açúcar, no subsistema de colheita de corte manual com queima prévia, a fim de verificar a viabilidade de utilização dessas informações de peso das cargas no gerenciamento da variabilidade dos talhões. Concluíram que existe uma determinada constância no peso médio das garradas das carregadoras. A quantificação da carga recolhida em cada ciclo e o georreferenciamento de cada garrada da carregadora mecânica pode fornecer parâmetros para a elaboração de mapas de produtividade e o conseqüente gerenciamento da variabilidade dos talhões.

2.7 Correlação entre produtividade e propriedades físicas e químicas do solo

Lütticken et al. (1997) obtiveram em seus estudos coeficientes de correlação bastante baixos entre os teores de nutrientes no solo e o rendimento das culturas e somente a matéria orgânica apresentou influência significativa em 4 de 24 talhões estudados.

Freitas et al. (2002) acompanharam um talhão de 22 ha ao longo de três ciclos da cultura da soja, onde foi monitorada e caracterizada a variabilidade espacial, tanto da produção como dos componentes e fatores de produção, os quais potencialmente interferem na variabilidade de produção. Os autores concluíram que a produtividade da soja correlacionou positivamente com os teores de areia e argila e negativamente com altura de planta, população de plantas por área, ocorrência de nematóides e concentração de cálcio e potássio no solo.

Manziona et al. (2002) utilizaram a geoestatística multivariada como método de análise das interações entre Cálcio, Magnésio e pH, e Fósforo, Matéria orgânica e pH, a fim de

determinar com maior precisão seu comportamento no solo. Os resultados obtidos indicaram que Ca, Mg e pH apresentaram altas correlações sendo interessante seu estudo para cálculo da aplicação de fertilizantes e corretivos, enquanto MO, P e pH mostraram comportamento independente entre si, através das baixas correlações e alta influência do P nos fatores espaciais.

Molin et al. (2002), com o objetivo de analisar as possíveis relações das manchas da produtividade da cultura do café com as variações na fertilidade do solo, correlacionaram o mapa de produtividade do café com os mapas dos componentes de fertilidade química do solo e obtiveram baixos valores de correlação.

Silva et al. (2003) relatam que há uma carência de informações que correlacionem a resistência mecânica do solo, de forma preditiva, com dados de produtividade. Os trabalhos desenvolvidos usam, geralmente, propriedades como a densidade do solo e resistência do solo à penetração, as quais não possibilitam prever a capacidade de suporte de carga (CSC) do solo, de forma que, em manejos futuros, os efeitos indesejáveis do tráfego e da mecanização possam ser evitados. Por tais motivos, os autores desenvolveram modelos de compressibilidade, e a partir da pressão de pré-consolidação avaliaram a influência da resistência mecânica do solo na produtividade de cana-de-açúcar, em solos do Estado de São Paulo. Os resultados obtidos permitiram concluir que a pressão de pré-consolidação, além de prever a capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas, pode ser utilizada como um parâmetro auxiliar no diagnóstico da queda de produtividade de cana-de-açúcar em áreas com elevada resistência mecânica.

Diversos outros trabalhos encontrados na literatura (Viana da Mata et al., 1999; Yanai et al., 2001; Vieira & Molin, 2001; Molin et al., 2001) relatam a baixa correlação entre fertilidade do solo e produtividade da cultura. Porém, no Brasil, para a cultura da cana-de-açúcar, não existem esses tipos de informação e por isso a necessidade de se realizar essas correlações.

3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido no talhão número 2 de 42 ha de cana-de-açúcar da Fazenda Santa Maria, pertencente à Usina São João Açúcar e Álcool (U.S.J), localizada no município de Araras – SP. As coordenadas geográficas são: 22° 23' 20" S (coordenada UTM 7522062 m) e 47° 27' 04" W (coordenada UTM 247620 m), elipsóide WGS84. A localização é justificada devido à experiência e representatividade da Usina São João no setor sucro-alcooleiro, uma das principais usinas de cana-de-açúcar do Estado. A Figura 2 mostra a localização geográfica da área de estudo, enquanto na Figura 3a e 3b podem ser observados respectivamente, o estágio da cultura no mês de dezembro de 2002, ou seja, um mês após o segundo corte da cana e o estágio da cultura em outubro de 2003, mês da colheita.

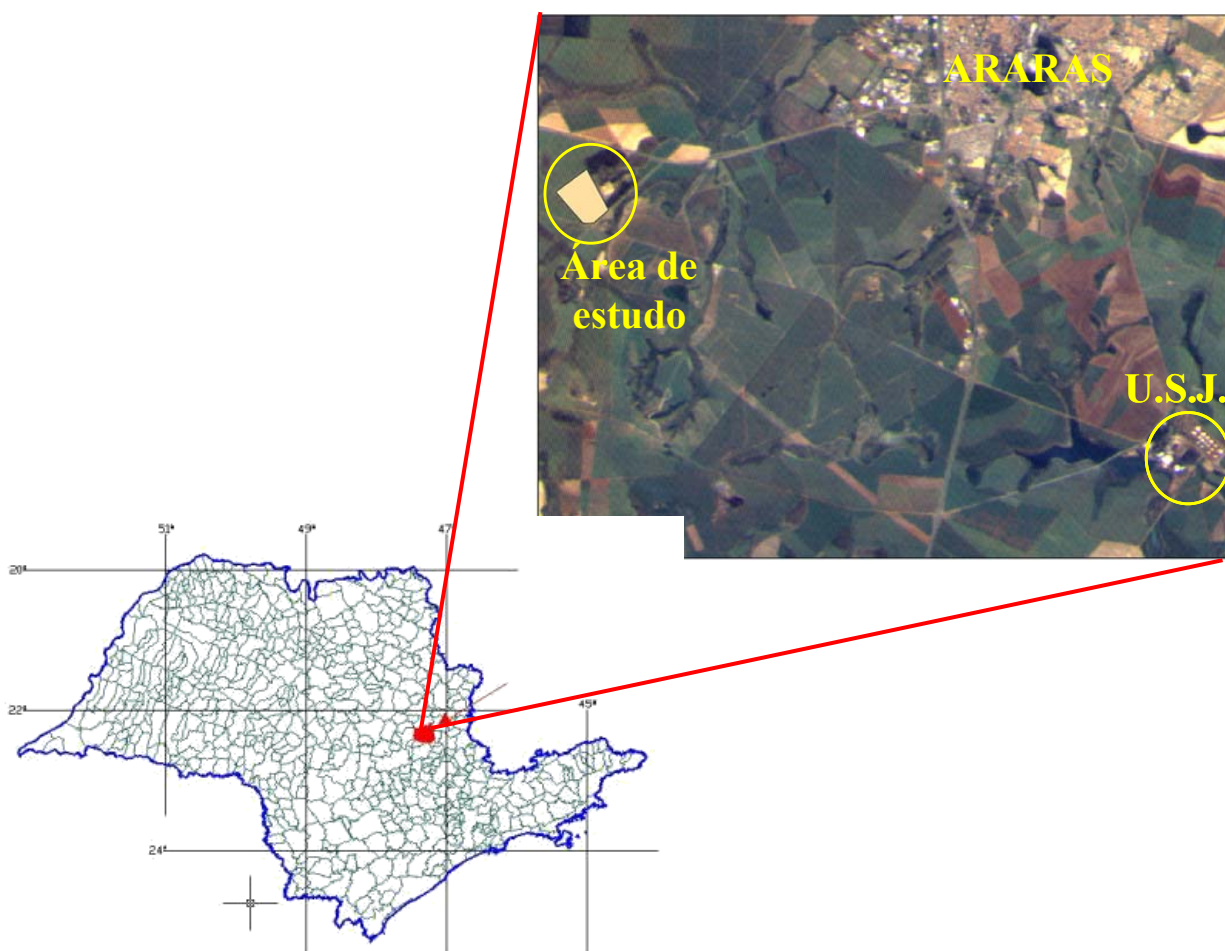


Figura 2. Localização da área de estudo (município de Araras) no estado de São Paulo.



(a)



(b)

Figura 3. Estágio da cultura da cana-de-açúcar na área de estudo: a) um mês após o segundo corte da cana e b) mês da terceira colheita.

A variedade de cana plantada em 2001, na área de estudo, foi a SP80-1816.

Na safra de 2001/2002 a produtividade média do talhão foi de $89,3 \text{ t ha}^{-1}$, na safra de 2002/2003 foi de $79,3 \text{ t ha}^{-1}$ e na safra de 2003/2004 foi de $89,8 \text{ t ha}^{-1}$. A cana-de-açúcar neste talhão é colhida crua e mecanicamente.

Segundo o levantamento realizado na escala 1:20.000, os solos do talhão são predominantemente Latossolos, especificamente o Latossolo Vermelho Amarelo. Há ainda uma pequena área de Argissolo Vermelho Amarelo, segundo o sistema de classificação de solos da Embrapa, (1999).

O clima da região é do tipo CWa, mesotérmico de inverno seco, segundo o sistema Köppen (OLIVEIRA et al.,1982). A distribuição das chuvas segue o regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, verão chuvoso e inverno seco. O balanço hídrico histórico assinala significativo período de deficiência hídrica, que se estende de maio a setembro. As médias de temperatura no inverno chegam em junho e julho a valores inferiores a 18°C , superando 22°C em janeiro e fevereiro. A Figura 4 mostra a média mensal da distribuição de chuvas para o período de 1995 a 2005 e a Figura 5 mostra a distribuição de chuvas para os anos de 2003 e 2004.

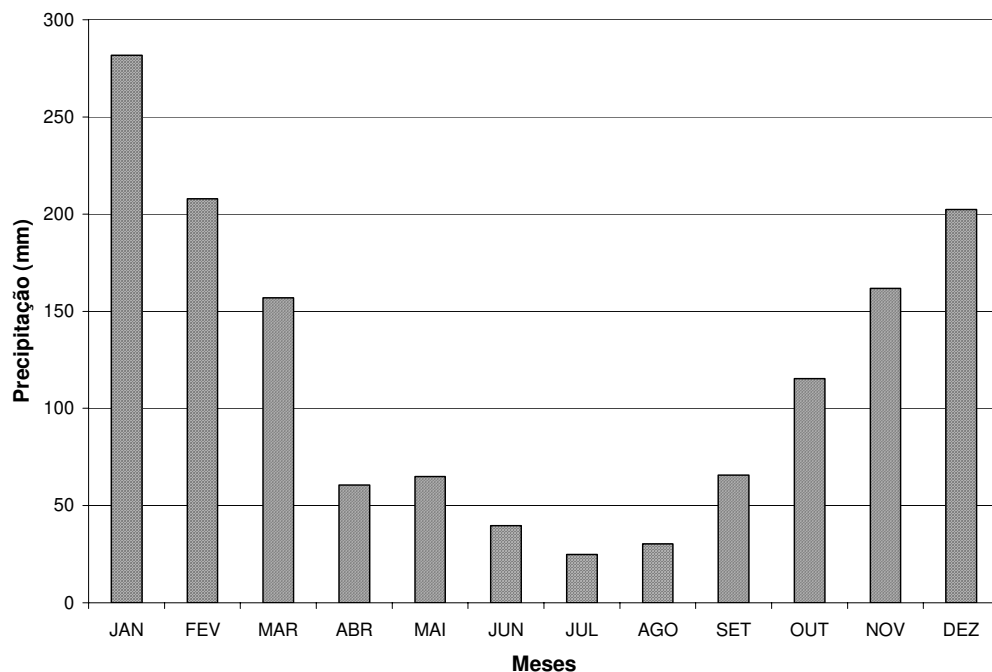


Figura 4. Média mensal de distribuição de chuvas para a cidade de Araras, SP, no ano de 1995 a 2005. Fonte: Usina São João.

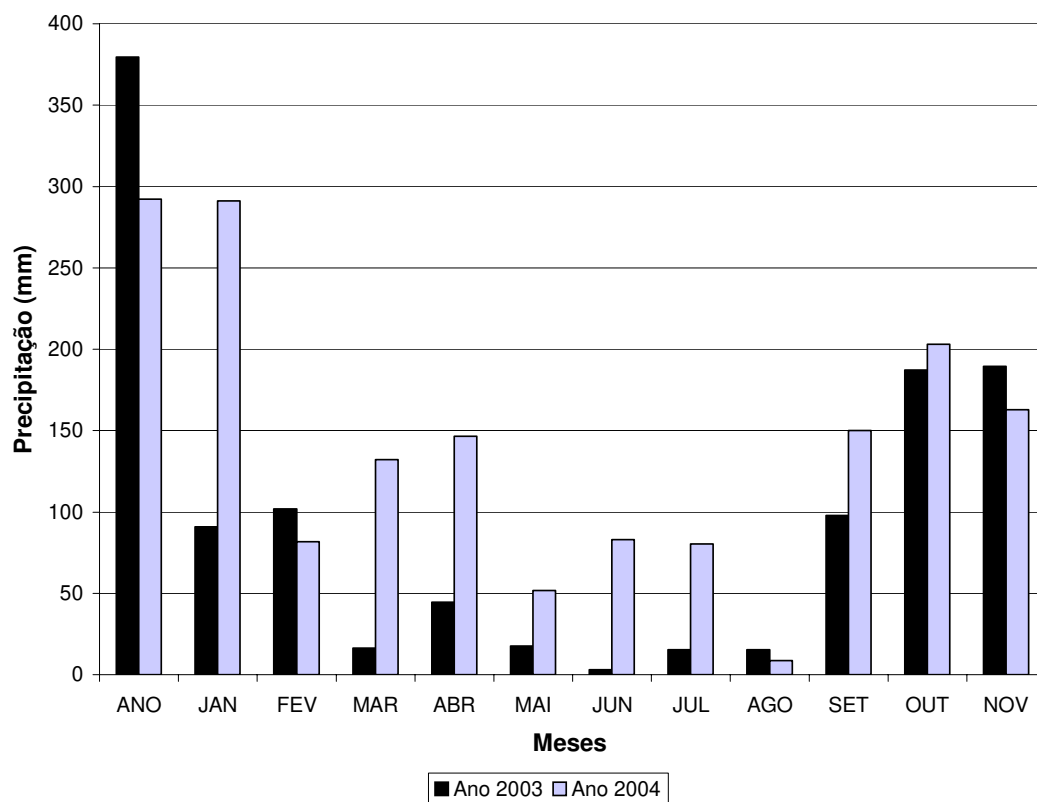


Figura 5. Distribuição de chuvas para a cidade de Araras, SP, nos anos de 2003 e 2004.

A declividade da área não ultrapassa 12%, valor limite para colheita mecanizada sem queima, devido a limitações do sistema de direção das colhedoras existentes no mercado. O Modelo Numérico do Terreno (MNT) concebido a partir de um levantamento planialtimétrico apresentado na Figura 6, ilustra a declividade e as vertentes presentes na área em estudo. Para a realização desse levantamento uma equipe da Usina São João estaqueou o talhão em uma malha de 50 x 50 m. Em cada ponto desta malha foi obtida sua cota, com o auxílio de uma estação total. Esta mesma malha foi usada, posteriormente para coleta de solo. O MNT foi gerado baseado nessas cotas equidistante de 50 m e interpoladas através da krigagem no software ArcGis versão 8.3.

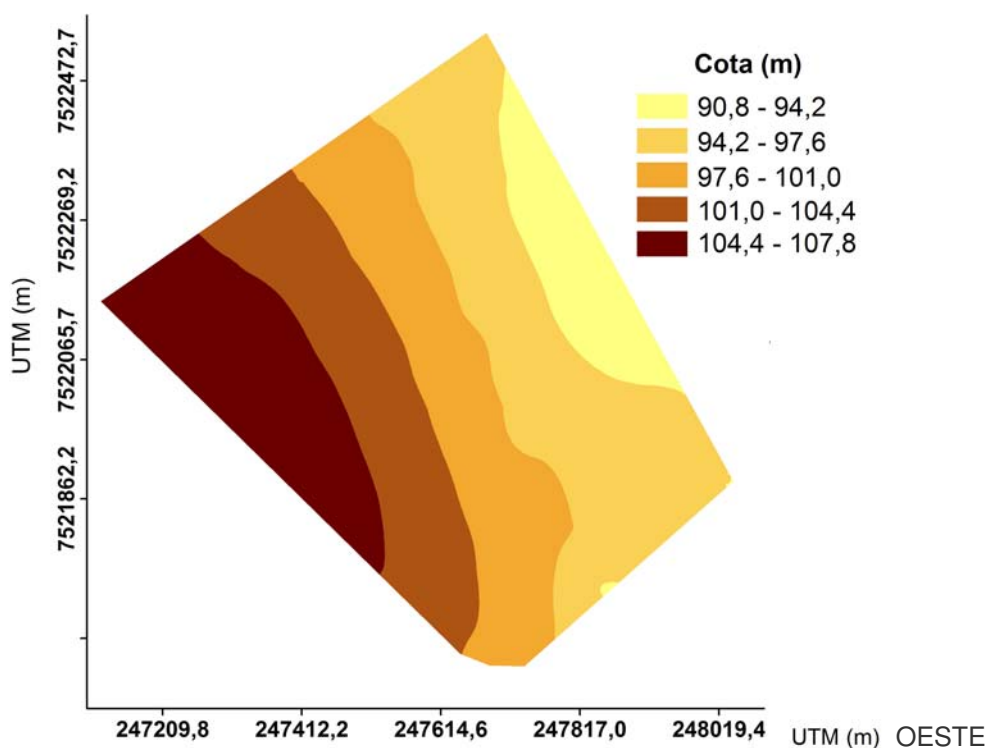


Figura 6. Levantamento planialtimétrico da área de estudo.

Dentre os fatores técnicos que influenciaram na escolha desse talhão como área de estudo pode-se citar: disponibilidade de informações referentes ao histórico da área e aos tratamentos culturais; controle rigoroso dos dados de produção e de estimativa de produtividade; estágio de corte; área do talhão e disponibilidade técnica para aplicação de determinadas práticas de coleta de dados.

4. AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO DE UMA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA

4.1 RESUMO

O presente estudo investigou a variação espacial de propriedades físicas e químicas do solo em uma área de 42 ha sob cultivo de cana-de-açúcar localizada na Usina São João em Araras, SP. Duas amostragens foram efetuadas em anos consecutivos. A primeira constitui uma grade regular de 50 m utilizada para coletar 170 amostras de solo nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. A segunda foi efetuada em uma grade regular de 100 m totalizando 46 amostras. Determinou-se em laboratório os macro e micronutrientes, granulometria, acidez, C, N, densidade do solo e resistência a penetração. Estatística descritiva clássica e geoestatística foram utilizadas para avaliar a dependência espacial dos atributos. Média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose foram calculados para cada variável. Em relação a primeira amostragem os semivariogramas, na maioria dos casos, mostraram-se bem estruturados com efeito pepita relativamente elevado. Os semivariogramas para densidade, Ca, Mg, V%, K, P, N, Cu, Fe e Mn foram melhor ajustados pelo modelo esférico; enquanto que os semivariogramas para argila, areia, pH em água, C e Zn foram melhor ajustados pelo modelo exponencial. Dois tipos de validação foram conduzidos (Jackknife e validação externa), indicando negligível tendenciosidade nos modelos de predição utilizados. Krigagem em blocos foi utilizada como técnica de interpolação dos dados e conseqüente geração dos mapas das variações espaciais das propriedades do solo. Em relação a segunda amostragem, os semivariogramas, na maioria dos casos, evidenciaram uma fraca estrutura com efeito pepita bastante elevados. Finalmente, discutiu-se os resultados em função dos possíveis processos e fatores que influenciam a distribuição espacial das propriedades de solos.

4.2 SUMMARY

The present study investigated the spatial variation of physical and chemical properties of the soil in a 42 ha area cultivated with sugarcane and located at Sao Joao Mill in Araras, São Paulo, Brazil. Two samplings were made in consecutive years. The first one constituted a 50 m regular grid used to collect 170 soil samples at 0-10, 10-20, and 20-30 cm deep. The second one was made by means of a 100 m regular grid, summing up 46 samples. Macro and micronutrients, granulometry, acidity, C, N, density, and penetration resistance were determined in laboratory. Classical descriptive statistics and geostatistics were used in order to evaluate the attributes spatial dependence. Average, standard deviation, coefficient of variation, asymmetry, and kurtosis were calculated for each variable. In relation to the first sampling, the semivariograms showed well-structured in most of the cases, with a nugget relatively high. The semivariograms for density, Ca, Mg, V%, K, P, N, Cu, Fe, and Mn were better adjusted by the spherical model, whereas the variograms for clay, sand, pH in water, C, and Zn were better adjusted by the exponential model. Two types of validation were carried out (Jackknife and external validation), indicating careless trend in the prediction models here in used. Kriging in blocks was used as an interpolation technique for the data and consequent generation of spatial variation maps of soil properties. In relation to the second sampling, the semivariograms evidenced a weak structure with a nugget high enough in most of cases. Finally, the results were discussed as a function of the possible processes and factors that influenced the spatial distribution of soil properties.

4.3 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é um componente essencial para a sustentabilidade do ecossistema agrícola e pode ser avaliada, em termos de magnitude e dinâmica, através dos atributos que a caracterizam, tais como textura, pH, disponibilidade de nutrientes, estoque de carbono, biomassa microbiana, resistência à penetração, entre outros (LARSON & PIERCE, 1994).

Entender como a distribuição espacial dos atributos físicos e químicos dos solos funciona é importante para o estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não somente à otimização da produtividade agrícola, mas também para a minimização de possíveis danos ambientais (McBRATNEY & PRINGLE, 1999).

As propriedades do solo, além de variar no espaço, podem variar no tempo, para uma dada posição no espaço (BERNOUX, 1998). Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades que em outras (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998; SLOT et al., 2001).

A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão.

Diferentes graus de dependência espacial têm sido observados para propriedades físicas (MAPA & KUMARAGAMAGE, 1996; BERNOUX, 1998; CASTRIGNANO et al., 2000) e químicas (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998; GONÇALVES, 1997; YANG et al., 2001; YANAI et al., 2001) do solo em diferentes ecossistemas do globo terrestre.

Segundo Vieira (1995) quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, deve-se utilizar um enfoque estatístico relativamente novo: a geoestatística. Por estatística clássica entende-se aquela que utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias e apresentam uma distribuição normal (OLIVIER & WEBSTER, 1991; WEBSTER, 2001; GASTON et al., 2001).

O conjunto de ferramentas estatísticas para o estudo da variabilidade espacial de uma propriedade qualquer, denominado geoestatística, tem como base a teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1971). De acordo com esse autor, a geoestatística é

a aplicação do formalismo das funções aleatórias para o reconhecimento e a estimativa de fenômenos naturais.

A quantificação da variabilidade espacial é útil em duas vias. A primeira é no mapeamento da propriedade em questão e a segunda é que o conhecimento dos erros associados ao modelo permite avaliar a qualidade dos resultados, definindo se estes atendem ao esperado, ou se a qualidade é superior à necessária. Neste caso, no futuro pode-se trabalhar com amostragem menos intensa, reduzindo custos. Por outro lado, a qualidade pode ser inferior à necessária. Neste caso, talvez seja necessário coletar mais dados, calibrar melhor o modelo, usar um modelo mais adequado, trabalhar em diferentes graus de resolução espacial, ou até mesmo escolher melhor método de predição (BURROUGH, 1993).

Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, pelo método denominado krigagem (GOOVAERTS, 1999; DEGGLE & RIBEIRO JÚNIOR, 2000; YANAI et al., 2001). A krigagem faz uso de um interpolador linear não tendencioso e de variância mínima que assegura a melhor estimativa. Este estimador tem como base os dados amostrais da variável regionalizada e as propriedades estruturais do semivariograma obtido a partir destes dados (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A utilidade dessa técnica nesta área de conhecimento é muito grande, sobretudo se a geoestatística for associada ao conjunto de ferramentas dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para o tratamento de dados distribuídos no espaço. (BOURGAULT et al., 1997).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo em uma área de 42 ha cultivada com cana-de-açúcar.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Coleta das amostras de solo – primeiro ano

A Figura 7 mostra o estágio da cultura no mês de março de 2003, três meses após o segundo corte da cana. Nesse período foi realizada a coleta das amostras de solo e o levantamento da compactação do solo da área.



Figura 7. Estágio da cultura da cana-de-açúcar na área de estudo.

A etapa da coleta das amostras de solo foi dividida em três partes. A primeira (item 4.4.1.1) refere-se à adaptação de um veículo amostrador de solos desenvolvido pelo laboratório de protótipos da UNICAMP (MAGALHÃES et al., 2003) no mecanismo de três pontos de um trator. Isto foi necessário, uma vez que o veículo amostrador não foi desenvolvido para trabalhar em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, devido sua bitola, altura em relação ao solo e tração do veículo. A segunda etapa (item 4.4.1.2) refere-se à amostragem do solo na área de estudo. A última parte (item 4.4.1.3) refere-se à determinação da compactação do solo.

4.4.1.1 Amostrador de solo

O amostrador é constituído por um tubo de PVC com 75 mm de diâmetro interno, que recebe a amostra, acondicionado dentro de um tubo cravador, estrutural, de alumínio, com 78,5 mm de diâmetro interno equipado com uma ponteira de aço SAE 1045 (Figura 8), com 69 mm de diâmetro interno, conicidade de 1% e altura de 44,3 mm. Estes quatro componentes formam um conjunto sem movimento rotativo.

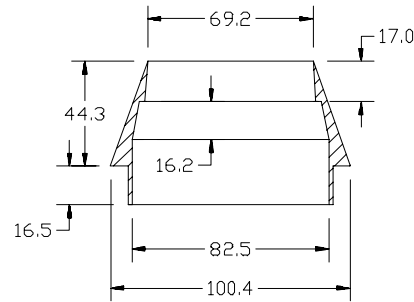


Figura 8. Ponteira de cravação do amostrador de solo (dimensões em mm).

Envolvendo este conjunto há uma rosca-sem-fim, soldada solidária a um tubo Schedule, com: passo de 85 mm, diâmetro externo de 140 mm e interno de 88,9 mm, responsável pela cravação do amostrador, equipada com três lâminas de corte na sua extremidade, rotacionada por um motor hidráulico (TRW MAB 08 torque de 1,1 kgm a 100 psi e deslocamento volumétrico de $96,7 \text{ cm}^3 \text{ rev}^{-1}$), a transmissão é feita por corrente de rolos com redução de 23/28, Figura 9.

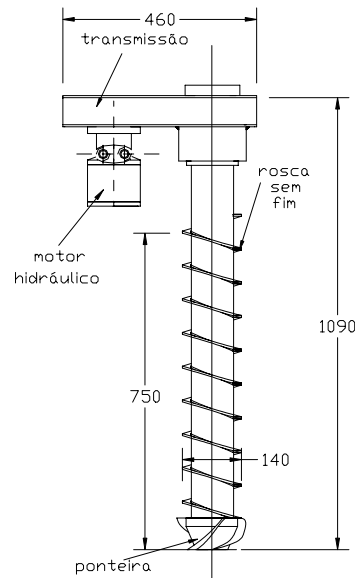


Figura 9. Amostrador. Dimensões em mm.

Ao conjunto mostrado na Figura 9 foi acoplado um cilindro hidráulico (com 1040 mm de comprimento, quando retraído, curso de 760 mm e diâmetro interno de 44,45 mm) responsável pelo movimento vertical do amostrador e conseqüente movimento de cravação do

amostrador no solo. Este sistema foi montado no engate de três pontos do trator como pode ser visto na Figura 10. O trator utilizado é da marca New Holland, modelo TM150.



Figura 10. Amostrador de solo montado nos três pontos do trator.

4.4.1.2 Amostragem do solo

A estratégia de amostragem de solos foi feita de modo a proporcionar a abrangência de toda a área e o maior número de informações possíveis. Para que essas condições fossem satisfeitas escolheu-se uma amostragem sistemática regular com espaçamento de 50 x 50 metros, perfazendo-se um total de 170 pontos de amostras no talhão de 42 ha.

Para a realização desse levantamento uma equipe da Usina São João estaqueou o talhão em uma malha de 50 x 50 m. Os pontos estaqueados foram georreferenciados com GPS (GEOExplorer III) e corrigidos por diferencial pós processado, utilizando-se de arquivos de correção obtidos da estação base referencial, da Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP, (Figura 11).

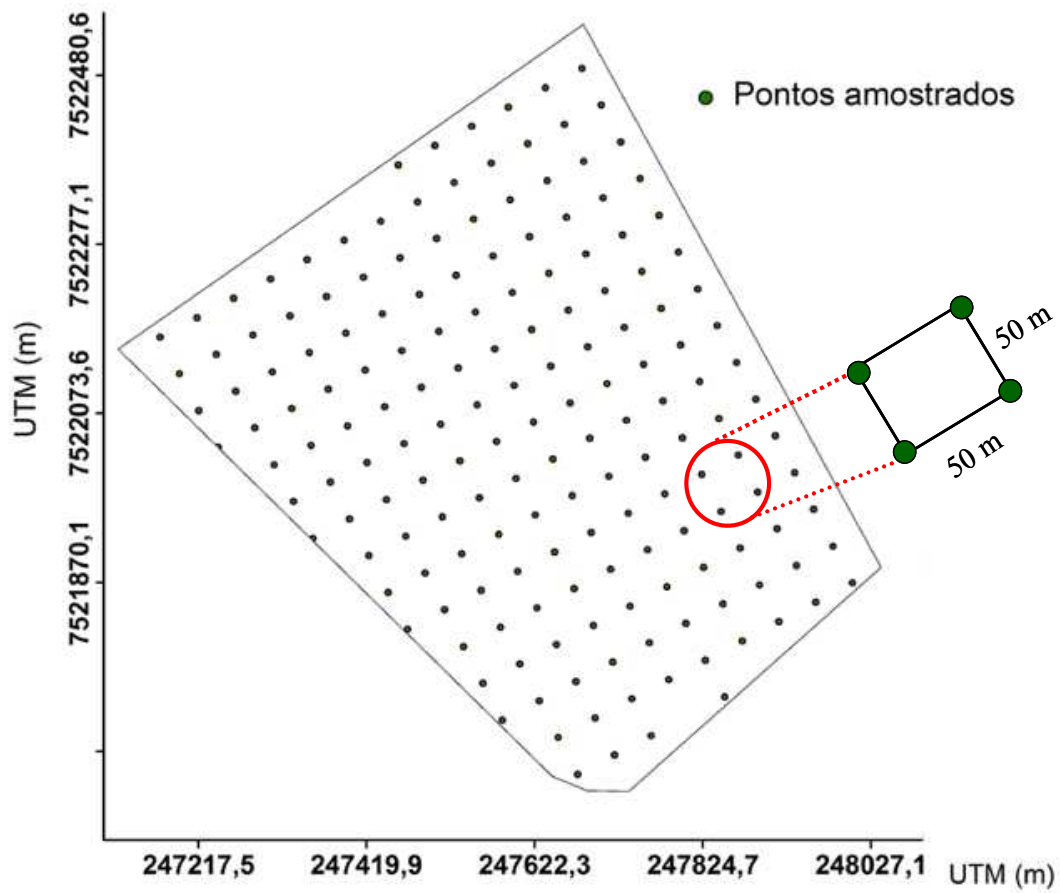


Figura 11. Grade amostral de 50 x 50 m para amostragem dos atributos físicos e químicos do solo.

Em cada um dos pontos com o auxílio do amostrador de solo desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP, retirou-se uma amostra não composta a uma profundidade de 0-60 cm. As etapas da coleta podem ser vistas na Figura 12.



Figura 12. Etapas da coleta de solo. a) Numeração e aplicação de uma película de óleo no tubo; b) Colocação do tubo no amostrador; c) Destravamento da sonda para posição vertical; d) Penetração do amostrador no solo; e) Outra vista da penetração do amostrador no solo; f) Retirada do tubo com solo do amostrador e colocação da tampa de vedação do tubo.

Devido à aderência do solo à parede do tubo de PVC, o que dificulta a retirada da amostra, compactando-a e comprometendo, com isso, a qualidade obtida, aplicou-se uma fina película de óleo SAE 30, ao longo do tubo de PVC antes de cada coleta da amostra.

4.4.1.3 Determinação da compactação do solo

Para se determinar a resistência do solo à penetração, utilizou-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar – Stolf. Os valores de resistência do solo à penetração, assim como a umidade do solo foram obtidos nos pontos da grade regular de 50 x 50 m. O princípio de utilização do penetrômetro é baseado na resistência do solo à penetração de uma haste, após o recebimento de um impacto provocado pelo deslocamento vertical de um bloco de ferro colocado na parte superior da haste, por uma distância conhecida, normalmente em torno de 400 mm. Quando o aparelho atinge zonas compactadas, o número de impactos necessários para penetração da haste é maior, indicando as zonas de compactação. A resistência do solo à penetração (R) foi determinada transformando-se o número de impactos do penetrômetro, através do perfil do solo em kgf cm^{-2} , por meio da Equação 1 desenvolvida por Stolf (1987):

$$R (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,89 N (\text{impactos dm}^{-1}) \quad \text{Eq. 1}$$

Na Figura 13 pode ser visto o processo de determinação da resistência do solo à penetração.



Figura 13. Determinação da resistência do solo à penetração.

4.4.2 Coleta das amostras de solo – segundo ano

O segundo levantamento da compactação do solo da área de estudo e a coleta das amostras de solo foi realizado no mês de março de 2004, exatamente um ano após o primeiro levantamento.

A fim de acompanhar as possíveis mudanças em relação à fertilidade do solo e sua compactação, uma nova amostragem foi realizada. Escolheu-se uma amostragem sistemática regular com espaçamento de 100 x 100 metros, perfazendo-se um total de 47 pontos de coleta no talhão de 42 ha. Essa nova grade de amostragem foi baseada nos resultados da análise geoestatística da amostragem anterior que previam um alcance de dependência espacial superior a 100 m.

A etapa da coleta das amostras de solo foi dividida em duas partes. A primeira (item 4.4.2.1) refere-se à amostragem do solo na área de estudo. A segunda etapa (item 4.4.2.2) refere-se à determinação da compactação do solo.

4.4.2.1 Amostragem do solo

Para cada ponto da grade amostral (100 x 100 m) foram coletadas, com o auxílio de um trado, amostras compostas (6 sub-amostras) de solo nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm (Figura 14).



Figura 14. Coleta de solo com trado.

Essas amostras foram embaladas, devidamente identificadas e enviadas para determinação do teor de água no solo e para serem analisadas quimicamente.

4.4.2.2 Determinação da compactação do solo

Tendo em vista as dificuldades encontradas na realização do primeiro ensaio, optou-se em utilizar um penetrômetro georreferenciado, marca DGL automação industrial LTDA, modelo PNT200 com capacidade de armazenagem de até 1228 medidas, com uma profundidade máxima de ensaio de 60 cm e valor máximo de força de penetração de 1000N (Figura 15). Este equipamento segue as normas ASAE, e registra o valor da resistência à penetração (MPa) de um cone padrão a uma velocidade constante de deslocamento.



Figura 15. Equipamento utilizado para avaliar a resistência a penetração do solo: (a) Penetrômetro DLG, (b) detalhe do penetrômetro com o GPS acoplado.

O GPS auxiliou na localização de cada ponto da malha de amostragem. Em cada ponto o penetrômetro era cravado até uma profundidade de 50cm e neste eram armazenados os dados de força à resistência de penetração a cada 1cm e a coordenadas geográficas. Esses dados armazenados no penetrômetro foram exportados para a planilha eletrônica Excel onde foram gerados gráficos para cada ponto relacionando força e profundidade. A partir desses gráficos pôde-se determinar o valor da resistência à penetração máxima para as seguintes camadas de profundidade 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Para cada camada foi gerado um mapa.

4.4.3 Preparo das amostras de solo

O preparo das amostras consistiu nas seguintes etapas:

1. Retirada do solo contido nos tubos de PVC. Para isso utilizou-se um “saca amostra” o qual pode ser visto na Figura 16. Este saca amostra é constituído de:
 - a) suporte para colocação do tubo com o solo;
 - b) suporte para colocação da canaleta de PVC, a qual tem a função de receber o cilindro de solo que sai do tubo;
 - c) manivela com uma rosca acoplada, a qual tem a função de empurrar o solo para fora do tubo. O solo era retirado no sentido da seta marcada em cada tubo, para evitar a compactação da camada superficial.



Figura 16. Detalhes do procedimento de remoção de amostras de solo (“Saca amostra”).

2. Divisão das amostras nas profundidades 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm. Após seccionada, as secções eram colocadas em bandejas para posterior pesagem (Figura 17).



Figura 17. Amostras referentes às profundidades 0-10 cm; 10-20 cm e 20-30 cm.

3. Pesagem de cada amostra úmida para posterior cálculo da densidade do solo (Figura 18).

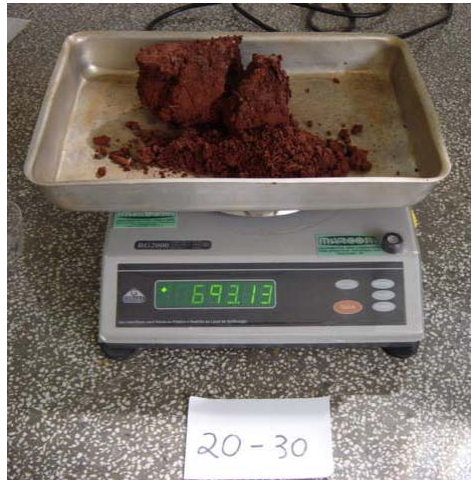


Figura 18. Pesagem das camadas de solo.

4. Raspagem superficial das secções de cada camada e retirada da porção central das amostras para realização das análises químicas e físicas. Isto foi feito com o objetivo de descartar o solo em contato com o óleo e assim evitar contaminações indesejáveis na análise de carbono (Figura 19).



Figura 19. Remoção da superficial lateral das secções de solo para evitar uma possível contaminação com óleo.

5. Retirada de aproximadamente 5g de solo úmido dessa porção central; colocação em cápsula tarada e introdução em estufa a 105 °C por 24 horas. Em seguida pesou-se novamente. Etapa realizada com o objetivo de determinar a umidade das amostras para correção do cálculo de densidade e resistência à penetração.
6. Secagem ao ar do restante da porção central retirada da amostra.
7. Tamisação em peneira de 2 mm.

8. Retirada de aproximadamente 5g do solo peneirado para ser totalmente moído a 60 meshes. Estes 5g foram utilizados para determinação de carbono e nitrogênio.
9. Colocação do solo peneirado a 2mm e do moído a 60 meshes (5g) em saquinhos plásticos separados, devidamente identificados, para posterior análise física (granulométrica) e química (macro e micronutrientes).

4.4.4 Análise física e química das amostras de solo

Para cada amostra da **primeira amostragem** foram feitas análises de granulometria, pH em H₂O e CaCl, P disponível, teores de Ca, Mg, K, H+Al, de C e N totais, Cu, Fe, Mn e Zn.

Para as análises de pH, cátions trocáveis, acidez e P disponível foram utilizados os métodos descritos por Raij et al. (1987).

A determinação de C e N totais foi realizada por combustão a seco, utilizando-se um analisador LECO CN-2000, em amostras moídas e peneiradas a 60 meshes.

A análise granulométrica foi efetuada pelo método do hidrômetro (EMBRAPA, 1979). A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, descrito pela EMBRAPA (1979).

Em relação à **segunda amostragem** todos os macronutrientes e pH em H₂O e CaCl foram analisados utilizando o mesmo processo acima descrito. A análise de micronutrientes e granulometria não foi realizada.

4.4.5 Análise geoestatística dos resultados e espacialização

Os resultados analíticos dos atributos físicos e químicos do solo para as amostras oriundas da primeira e segunda coleta, foram tratados por meio de métodos geoestatísticos.

A análise estatística dos dados obtidos foi efetuada em duas etapas: (a) estatística descritiva clássica, que assume que dados observados são independentes uns dos outros não considerando sua localização no terreno, (b) análise semivariográfica, utilizada para calcular qualquer dependência espacial existente.

Antes dessas duas etapas os resultados analíticos do conjunto total de 170 pontos coletados na **primeira amostragem** foram divididos aleatoriamente em dois grupos. Um

grupo com 90% dos dados foi utilizado para construir os semivariogramas experimentais. O segundo grupo, com aproximadamente 10% dos dados totais, foi utilizado para efetuar uma validação externa. A proporção adotada visa otimizar tanto os procedimentos de construção dos semivariogramas com o maior número de dados possíveis (90%) assim como, reservar uma quantidade mínima de dados (10%) necessária para a validação externa. Tal proporção é amplamente utilizada em estudos envolvendo geoestatística em ciência do solo (BOURENNANE et al. 1996, BERNOUX et al., 1998, CERRI et al., 2004)

Análise estatística clássica

Nessa etapa da análise estatística dos dados foram calculados a média, valor máximo e mínimo, desvio padrão, variância, assimetria e curtose para cada conjunto de dados (conjunto com 90% e 10% dos dados). Essa etapa é importante tanto para identificar dados discrepantes, assim como para comparar a semelhança dos dois grupos de dados mencionados anteriormente.

Análise geoestatística

As análises geoestatística dos dados foram realizadas com o auxílio do programa “Geostatistical Analyst do ArcGis Versão 8.3”.

Utilizando-se o conjunto com maior quantidade de dados (90% dos dados) e o programa ArcGis, foi possível construir os semivariogramas experimentais e posteriormente ajustar modelos matemáticos para cada um dos semivariogramas gerados. Após o ajuste dos modelos aos semivariogramas, foi efetuada uma validação interna, também conhecida como “Jack-knife”. Tal validação consiste basicamente em testar a adequação do modelo ajustado para o conjunto de dados contidos nos semivariogramas.

Com o intuito de se verificar a eficácia da análise geoestatística como um todo, foi efetuada uma validação externa. Tal validação consiste em realizar o processo de krigagem pontual utilizando os 90% dos dados para estimar os valores dos 10% dos dados não incluídos na construção dos semivariogramas. Por meio da comparação dos valores estimados (krigagem pontual), com os valores medidos, é possível verificar quantitativamente a acurácia da análise geoestatística como um todo.

Considerando-se satisfatório o resultado da validação externa, utiliza-se os 100% dos dados disponíveis (conjunto de 90% dos dados mais os 10% dos dados não incluídos), para realizar novamente as etapas de construção dos semivariogramas, ajuste dos modelos aos semivariogramas e finalmente o processo de krigagem em blocos. A krigagem em blocos é uma técnica interpolativa de estimativa baseada em minimização da variância do erro. O uso crescente desta técnica é devido, principalmente, ao fato de produzir, juntamente com os mapas de valores estimados, medidas associadas de precisão para cada ponto ou zona estimada. De acordo com McBratney & Webster (1986) a krigagem em bloco produz mapas mais suavizados do que a krigagem pontual, uma vez que interpola valores médios para cada bloco, amenizando descontinuidades localizadas.

Para análise estatística da **segunda amostragem** utilizou-se 100% dos resultados analíticos, ou seja, a população total não foi dividida em 90% e 10% devido ao reduzido número de pontos coletados (total de 46 pontos). Os mesmos procedimentos efetuados na primeira amostragem foram adotados nesta fase porém, utilizando 100% dos dados.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados descritos a seguir referem-se ao primeiro ano (item 4.5.1) e ao segundo ano de amostragens (item 4.5.2).

4.5.1 Resultados do primeiro ano de amostragem

Os resultados aqui descritos referem-se aos dados de macro e micronutrientes, acidez, resistência a penetração, granulometria e densidade para as camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm do solo. A análise estatística foi efetuada em duas etapas: estatística descritiva clássica (item 4.5.1.1) e análise semivariográfica (item 4.5.1.2).

4.5.1.1 Estatística descritiva clássica

Antes de iniciar a análise estatística, o conjunto de 170 pontos amostrados foi dividido em dois sub-conjuntos. A Figura 20 mostra a área de estudo com os 90 % dos dados (●) e os 10% dos dados retirados para posterior validação externa (*).

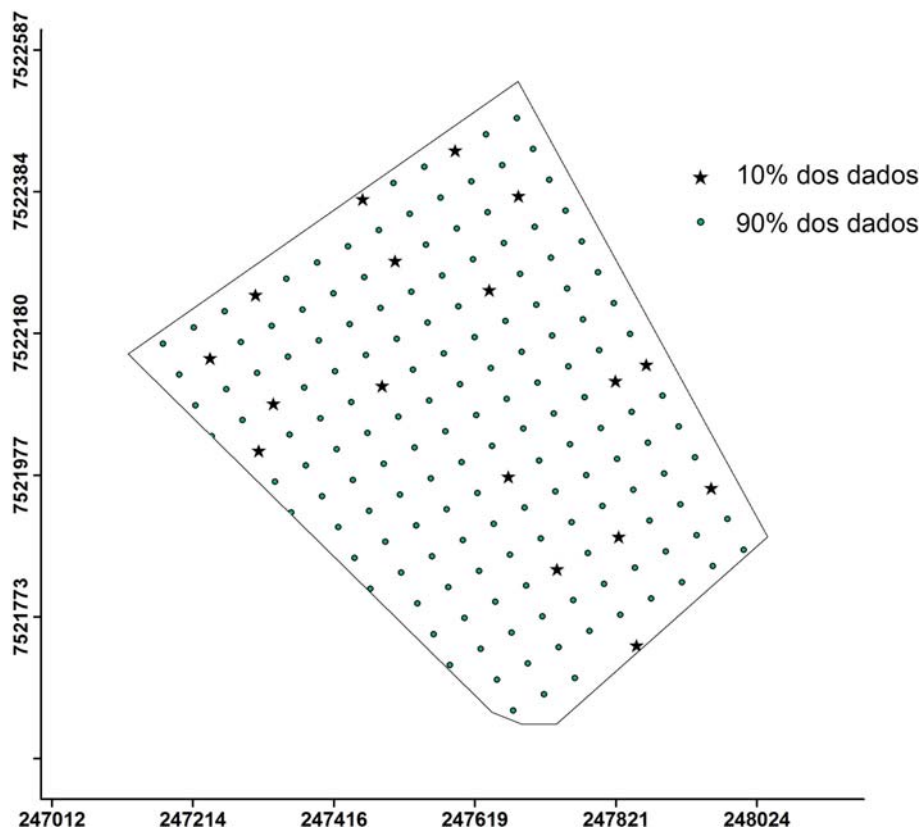


Figura 20. Mapa representando a área de estudo com os 10% dos dados retirados.

Os resultados da estatística descritiva clássica para os 100% dos dados obtidos das dezenove propriedades físicas e químicas (argila, areia, pH em H₂O e CaCl, P disponível, Ca, Mg, K, H+Al, C e N totais, Cu, Fe, Mn e Zn e densidade) nas três camadas de solo avaliada podem ser observados na Tabela 1. A Tabela 2 também apresenta resultados das estatísticas descritivas, porém analisadas separadamente para os dois conjuntos contendo 90% e 10% dos dados totais.

Tabela 1. Estatística descritiva para os 100% dos dados nas camadas amostradas.

Propriedade	n	Média	Mediana	DP	CV	Mín.	Máx.	Curt	Assime
<i>Camada 0-10 cm</i>									
Altitude	169	99,54	99,09	4,58	4,60	84,07	107,79	-0,47	-0,02
Argila	170	30,24	29,83	7,75	25,62	12,02	59,47	1,62	0,86
Silte	170	6,05	6,15	1,66	27,36	2,10	10,24	-0,72	0,26
Areia	170	63,71	64,46	8,51	13,36	31,72	81,96	1,37	-0,86
pH (H ₂ O)	170	6,28	6,27	0,35	5,54	4,96	7,21	1,95	-0,72
pH (CaCl)	170	5,68	5,71	0,53	9,41	4,29	7,09	-0,20	-0,09
H+AL	170	22,14	20,70	6,87	31,01	9,30	45,00	0,19	0,71
Ca	170	28,26	26,21	11,84	41,91	3,43	77,67	3,17	1,33
Mg	157	13,93	13,61	4,97	35,68	1,92	28,65	0,25	0,37
K	160	9,51	5,15	9,03	94,97	0,50	38,80	1,17	1,38
V%	170	69,14	71,46	14,36	20,77	15,88	94,97	0,51	-0,71
P	170	54,72	30,15	44,56	81,43	2,20	174,60	-0,45	0,84
N	161	0,09	0,07	0,04	51,01	0,02	0,21	1,07	1,33
C	170	1,27	1,21	0,35	27,79	0,51	2,37	0,49	0,84
Cu	170	0,76	0,72	0,26	33,69	0,34	1,48	-0,70	0,38
Fe	170	20,75	18,98	7,94	38,28	7,31	53,53	1,67	1,18
Mn	170	4,54	3,96	2,82	62,21	0,97	19,70	6,13	1,94
Zn	161	0,79	0,60	0,57	72,16	0,05	2,68	0,61	1,11
Densidade	170	1,27	1,29	0,17	13,34	0,68	1,70	1,14	-0,66
<i>Camada 10-20 cm</i>									
Argila	170	32,31	31,38	8,18	25,33	18,26	62,10	1,00	0,75
Silte	170	5,69	6,12	1,72	30,19	2,00	10,21	-0,18	-0,04
Areia	170	61,99	62,66	8,71	14,05	31,48	77,23	0,71	-0,68
pH (H ₂ O)	170	5,85	5,81	0,48	8,28	4,66	7,17	-0,10	0,11
pH (CaCl)	170	5,06	4,95	0,65	12,93	4,01	6,82	-0,36	0,67
H+AL	170	32,63	31,50	12,50	38,32	11,50	68,60	-0,47	0,40
Ca	165	14,31	12,27	7,95	55,57	2,58	36,50	-0,20	0,77
Mg	161	8,90	8,24	4,54	51,00	1,68	21,41	0,05	0,77
K	157	4,52	2,70	4,32	95,52	0,10	19,90	0,68	1,19
V%	170	47,79	45,61	20,77	43,47	10,27	94,54	-1,03	0,22
P	170	33,35	17,10	35,71	107,06	0,70	162,50	2,05	1,63
N	152	0,07	0,06	0,04	54,55	0,01	0,20	1,12	1,31
C	170	0,99	0,94	0,32	31,99	0,07	2,25	1,66	0,86
Cu	170	0,83	0,83	0,27	32,44	0,32	1,47	-0,93	0,07
Fe	170	23,96	21,80	8,78	36,63	7,79	53,86	0,23	0,70
Mn	165	2,20	1,76	1,39	63,18	0,49	6,88	0,97	1,18
Zn	169	0,24	0,18	0,18	74,86	0,03	1,10	4,04	1,81
Densidade	170	1,35	1,36	0,14	10,44	0,93	2,02	2,53	0,30
<i>Camada 20-30 cm</i>									
Argila	170	34,17	33,53	8,35	24,42	18,50	61,88	0,57	0,64
Silte	170	5,74	6,14	1,68	29,23	2,06	10,27	-0,22	0,13
Areia	170	60,09	60,58	8,89	14,80	29,28	75,23	0,55	-0,68
pH (H ₂ O)	170	5,40	5,41	0,49	9,08	4,38	6,87	-0,02	0,36
pH (CaCl)	170	4,56	4,45	0,43	9,45	4,00	6,07	2,03	1,43
H+AL	170	38,15	38,10	11,54	30,24	14,80	74,70	0,22	0,42
Ca	159	6,77	6,14	3,34	49,35	1,31	16,19	0,18	0,80
Mg	165	5,27	4,99	2,14	40,60	1,72	11,38	-0,01	0,64
K	159	2,19	1,30	2,41	110,42	0,10	12,30	4,51	2,07
V%	170	31,17	27,37	16,23	52,07	7,89	81,79	0,62	1,01
P	157	12,47	8,90	11,24	90,12	0,30	49,30	0,77	1,19
N	152	0,06	0,05	0,04	56,41	0,01	0,19	2,03	1,46
C	170	0,84	0,80	0,25	29,33	0,05	1,53	0,41	0,52
Cu	170	0,86	0,87	0,27	30,80	0,39	1,47	-0,94	0,13
Fe	170	21,04	19,14	7,46	35,47	4,25	55,30	2,41	1,17
Mn	162	1,42	1,15	0,79	55,71	0,29	3,84	0,37	1,03
Zn	170	0,11	0,08	0,10	92,74	0,01	0,57	8,63	2,70
Densidade	170	1,35	1,35	0,13	9,95	0,98	1,67	-0,11	-0,05

Pode-se verificar que algumas das variáveis apresentam número de observações (**n**, na Tabela 1) inferiores que as demais. Este fato se deve a retirada de valores discrepantes, “outliers”. Os “outliers” são valores que se encontram fora dos limites estabelecidos de acordo com metodologia proposta por Tukey (1977), o qual determina os limites superior e inferior para dados discrepantes baseando-se no primeiro e terceiro quartil. Um exemplo desse procedimento pode ser observado para o Mg na camada 0-10cm, em que 13 valores foram considerados discrepantes (Tabela 1).

Avaliando se os valores de média e mediana para cada variável estudada e em cada profundidade nota-se que tais valores são similares. Exceções ocorrem para as variáveis P e K, que podem ser explicadas pela grande amplitude dos dados (valores máximos e mínimos na Tabela 1).

Coeficientes de variação (CV) são adimensionais e permitem a comparação de valores entre diferentes propriedades do solo. Valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados (RIBEIRO JUNIOR, 1995; GOOVAERTS, 1999 e FROGBROOK et al., 2002). Os valores apresentados nas Tabela 1 variam desde 4,60 para altitude na camada 0-10 cm de profundidade até 110,42 para as concentrações de K na camada 20-30 cm do solo.

A interpretação dos resultados da estatística descritiva clássica possibilitou a constatação de que nenhum dos dois conjuntos de dados (contendo 90% e 10% dos resultados analíticos totais, Tabela 2) apresenta valores discrepantes. Após a verificação de que as médias das propriedades dos solos não diferem estatisticamente (teste-t, $\alpha = 0,05$) entre os dois conjuntos de dados mencionados anteriormente, conduziu-se então, a etapa de análise semivariográfica.

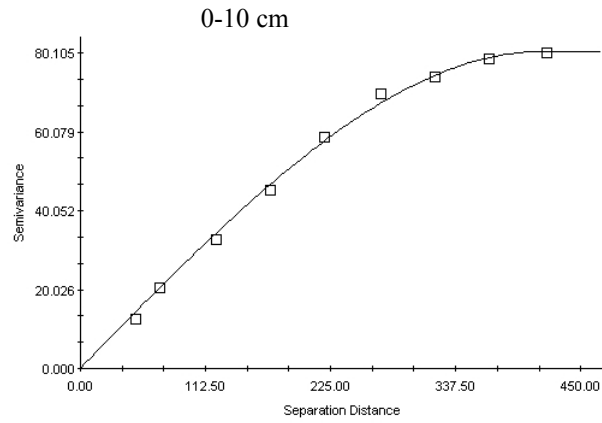
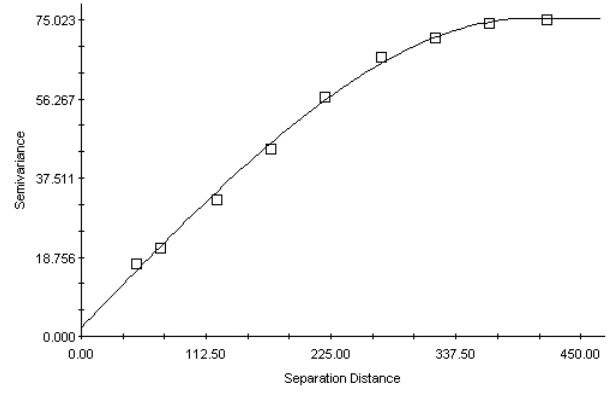
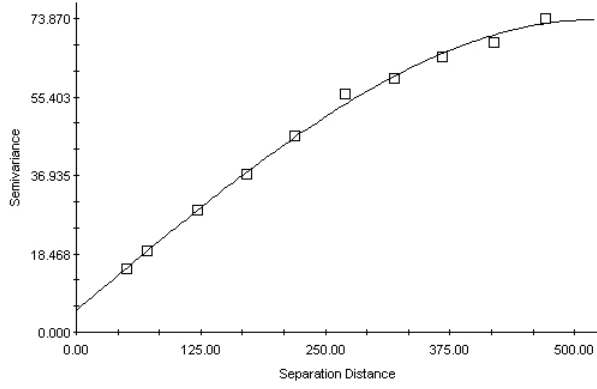
Tabela 2. Estatística descritiva clássica dos conjuntos 90% e 10% de dados

Propriedade	Dados para construção do variograma				Dados para validação externa			
	<i>n</i>	Média	Mediana	CV%	<i>n</i>	Média	Mediana	CV%
<i>Camada 0-10 cm</i>								
Altitude	152	98,93	99,45	9,35	16	99,11	98,52	4,92
Argila	153	29,97	29,44	25,68	17	32,67	30,74	24,58
Silte	153	5,97	6,12	27,35	17	6,79	6,24	25,48
Areia	153	64,06	64,77	13,14	17	60,54	62,62	14,76
pH (H ₂ O)	153	6,30	6,28	5,21	17	6,12	6,20	7,75
pH (CaCl)	153	5,68	5,71	9,17	17	5,63	5,59	11,69
H+AL	153	22,05	20,70	30,67	17	22,99	20,70	34,50
Ca	153	28,49	25,97	41,28	17	26,19	26,44	48,69
Mg	140	16,10	14,07	58,30	16	15,09	13,98	51,37
K	143	15,03	5,60	168,83	16	7,77	3,70	131,83
V%	153	69,62	71,58	19,74	17	64,78	69,69	29,34
P	153	55,64	30,30	79,37	17	46,51	20,40	104,66
N	144	0,10	0,08	70,11	16	0,08	0,06	53,74
C	153	1,28	1,21	28,06	17	1,18	1,19	23,90
Cu	153	0,75	0,72	32,68	17	0,81	0,91	41,37
Fe	153	20,72	18,95	37,38	17	21,04	19,48	46,74
Mn	153	4,56	3,99	62,62	17	4,34	3,24	59,55
Zn	144	0,97	0,62	108,18	16	1,29	0,52	160,14
Densidade	153	1,27	1,29	12,91	17	1,25	1,24	17,26
<i>Camada 10-20 cm</i>								
Argila	153	32,4	31,4	8,1	17	31,9	30,5	8,9
Silte	153	5,7	6,1	1,8	17	5,5	6,1	1,3
Areia	153	61,9	62,4	8,7	17	62,6	63,4	9,2
pH (H ₂ O)	153	5,8	5,8	0,5	17	5,9	5,8	0,6
pH (CaCl)	153	5,1	5,0	0,6	17	5,0	4,8	0,7
H+AL	153	32,6	31,5	12,4	17	32,9	32,5	14,0
Ca	148	15,8	12,7	11,2	16	13,5	9,6	10,6
Mg	144	10,2	8,6	7,2	16	9,4	7,8	6,9
K	140	9,3	3,3	22,5	16	4,0	2,0	4,7
V%	153	48,3	47,2	20,6	17	42,9	36,7	22,7
P	153	33,5	17,4	35,6	17	31,6	13,8	38,0
N	135	0,1	0,1	0,2	16	0,1	0,1	0,1
C	153	1,0	1,0	0,3	17	0,9	0,9	0,2
Cu	153	0,8	0,8	0,3	17	0,8	0,8	0,3
Fe	153	24,0	21,8	8,7	17	23,2	21,0	10,1
Mn	148	2,5	1,9	2,0	16	1,5	1,5	0,9
Zn	152	0,3	0,2	0,2	16	0,2	0,2	0,1
Densidade	153	1,3	1,4	0,1	17	1,4	1,4	0,2
<i>Camada 20-30 cm</i>								
Argila	153	33,96	33,40	24,16	17	36,08	35,20	26,57
Silte	153	5,79	6,15	29,54	17	5,29	4,29	24,67
Areia	153	60,25	60,66	14,54	17	58,63	58,25	17,40
pH (H ₂ O)	153	5,40	5,40	9,06	17	5,38	5,45	9,57
pH (CaCl)	153	4,56	4,44	9,66	17	4,56	4,56	7,55
H+AL	153	38,03	37,70	30,96	17	39,25	40,10	23,88
Ca	143	6,75	6,09	50,52	16	6,85	6,40	39,27
Mg	148	5,20	4,98	40,19	16	5,32	5,07	47,56
K	143	2,16	1,30	112,96	16	2,40	1,85	89,17
V%	153	31,18	26,97	53,35	17	31,08	28,97	39,94
P	141	12,60	8,90	91,90	16	11,03	8,55	69,17
N	136	0,08	0,06	106,67	16	0,07	0,06	50,77
C	153	0,84	0,80	29,07	17	0,82	0,73	32,66
Cu	153	0,85	0,84	30,70	17	0,93	0,97	31,50
Fe	153	20,84	19,16	34,34	17	22,82	19,08	43,34
Mn	145	1,42	1,17	54,23	16	1,34	1,04	70,15
Zn	153	0,11	0,08	91,33	17	0,12	0,08	104,95
Densidade	153	1,36	1,36	9,92	17	1,31	1,31	9,72

4.5.1.2 Análise semivariográfica.

Análise semivariográfica foi realizada utilizando-se o conjunto com 90% dos dados totais. Verificou-se, primeiramente, que a variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas avaliadas possui característica isotrópica. Como não se observou comportamento anisotrópico em nenhuma das propriedades do solo para nenhuma das camadas amostradas, todas as demais etapas da análise semivariográfica foram realizadas considerando comportamentos isotrópicos dos dados. O ajuste do modelo ao semivariograma foi efetuado através da análise de quadrado mínimo, oriunda do programa “Geostatistical Analyst do ArcGis Versão 8.3”

Em geral, os semivariogramas construídos para os dezenove atributos físico e químicos das três camadas de solo investigadas apresentaram relativamente elevados efeito pepitas. As Figuras 21 e 22 e 23 ilustram respectivamente os semivariogramas construídos para a variável argila e cálcio nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm e potássio, fósforo e zinco para camadas 0-10 cm.

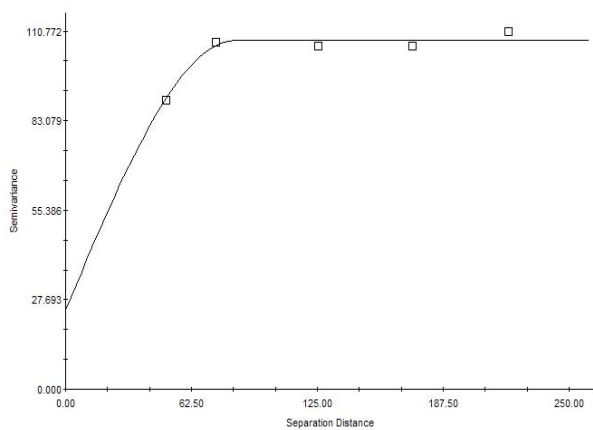


0-10 cm

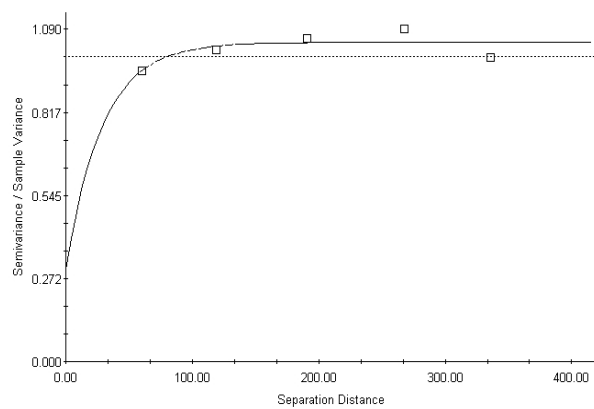
10-20 cm

20-30 cm

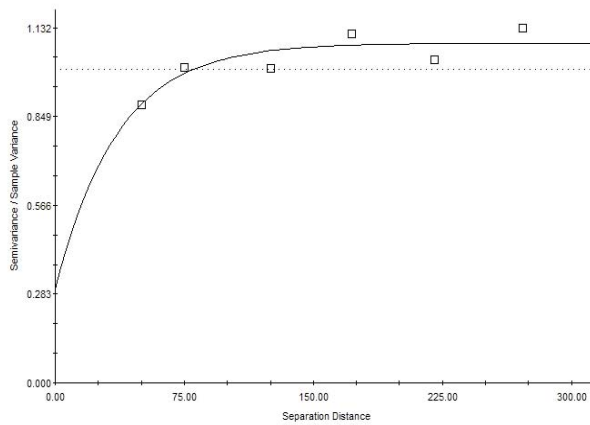
Figura 21. Semivariograma do atributo argila relativo às camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm



0-10 cm



10-20 cm



20-30 cm

Figura 22. Semivariograma do atributo cálcio relativo às camadas 0-10, 10-20 e 20-30cm

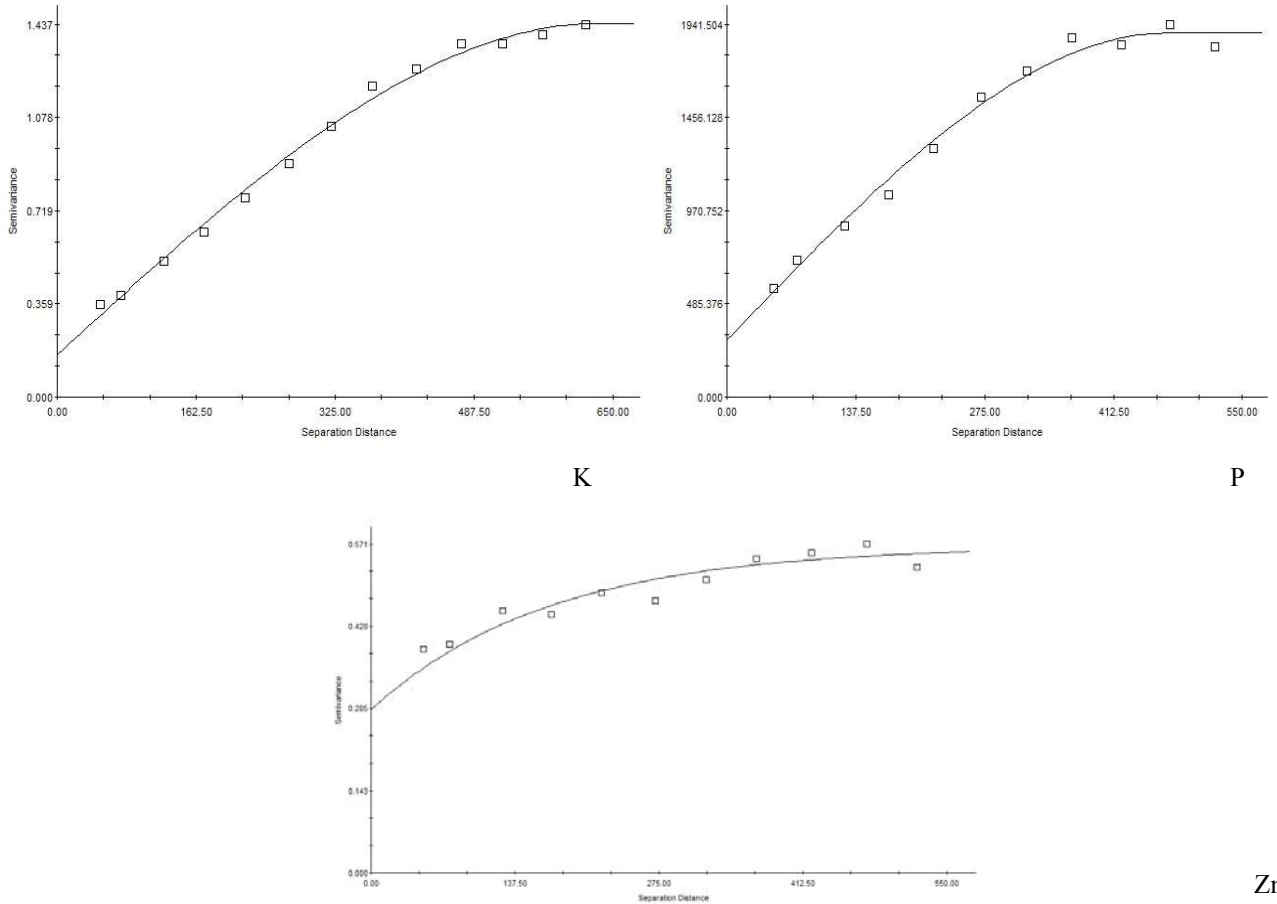


Figura 23. Semivariograma do atributo potássio, fósforo e zinco relativo à camada 0-10 cm.

Modelos teóricos compostos foram ajustados aos dados dos semivariogramas experimentais (Tabela 3 e 4). O efeito pepita encontrado é causado por erro ou nas etapas de amostragem/determinação analítica dos resultados ou pela variação não detectada segundo a escala de amostragem adotada (malha regular de 50 m) nesta pesquisa. O modelo esférico foi o que melhor se ajustou aos dados dos semivariogramas das propriedades densidade do solo, Ca, Mg, V%, K, P, N, Cu, Fe e Mn enquanto que os modelo exponencial foi o mais apropriado para argila, areia, pH em água, C e Zn.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas da densidade, granulometria, acidez e macronutrientes do solo.

Profundidade	Modelo	Efeito pepita (Co)	Patamar (C+Co)	Alcance Ao	Proporção Co/(C+Co)
(cm)		(unidade) ²		(m)	(%)
<u>Densidade</u>					
0-10	esférico	0.01946	0.0293	250	66
10-20	esférico	0.01368	0.01975	300	69
20-30	esférico	0.00944	0.01886	308	50
<u>Argila</u>					
0-10	esférico	5.20	74.55	593	7
10-20	esférico	2.10	84.27	593	2
20-30	esférico	0.10	88.40	593	0.1
<u>Areia</u>					
0-10	esférico	3.10	91.14	593	3
10-20	esférico	2.10	96.55	593	2
20-30	esférico	0.10	101.05	593	0.1
<u>pH (H₂O)</u>					
0-10	exponencial	0.091	0.123	259	74
10-20	exponencial	0.139	0.255	276	55
20-30	exponencial	0.138	0.281	212	49
<u>pH (CaCl)</u>					
0-10	exponencial	0.205	0.288	150	71
10-20	esférico	0.306	0.476	249	64
20-30	esférico	0.135	0.217	179	62
<u>H+Al</u>					
0-10	exponencial	30.481	51.690	593	59
10-20	exponencial	78.150	171.890	402	45
20-30	exponencial	66.522	150.793	533	44
<u>Ca</u>					
0-10	esférico	135.060	143.871	87	94
10-20	esférico	58.433	63.791	110	92
20-30	esférico	10.625	11.346	165	94
<u>Mg</u>					
0-10	esférico	21.084	24.942	129	85
10-20	esférico	18.056	21.716	250	83
20-30	esférico	4.142	4.759	193	87
<u>V%</u>					
0-10	esférico	165.220	218.142	500	76
10-20	esférico	305.080	456.840	305	67
20-30	esférico	224.930	271.241	281	83
<u>K</u>					
0-10	esférico	16.658	95.482	524	17
10-20	esférico	5.149	22.116	463	23
20-30	exponencial	2.998	6.443	550	47
<u>P</u>					
0-10	esférico	541.59	2588.49	611	21
10-20	esférico	506.27	1552.2	593	33
20-30	esférico	66.78	151.34	593	44

Tabela 4. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas do carbono, nitrogênio e micronutrientes do solo.

Profundidade	Modelo	Efeito pepita	Patamar	Alcance	Proporção
(cm)		(Co)	(C+Co)	Ao	Co/(C+Co)
		(unidade) ²		(m)	(%)
<u>C</u>					
0-10	exponencial	0,0267	0,1521	470	18
10-20	exponencial	0,0432	0,1087	325	40
20-30	exponencial	0,0168	0,0721	466	23
<u>N</u>					
0-10	esférico	0,00126	0,00199	300	63
10-20	esférico	0,00114	0,00182	450	63
20-30	esférico	0,00080	0,00134	450	60
<u>Cu</u>					
0-10	esférico	0,00529	0,08512	593	6
10-20	esférico	0,00729	0,09469	593	8
20-30	esférico	0,00573	0,09243	593	6
<u>Fe</u>					
0-10	esférico	29,329	75,908	550	39
10-20	esférico	35,888	89,727	475	40
20-30	esférico	33,387	65,105	558	51
<u>Mn</u>					
0-10	esférico	4,874	8,199	350	59
10-20	esférico	1,508	2,101	593	72
20-30	esférico	0,543	0,651	518	83
<u>Zn</u>					
0-10	exponencial	0,1946	0,3293	250	59
10-20	exponencial	0,0291	0,0335	250	87
20-30	exponencial	0,0072	0,0102	250	70

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, pode-se constatar que as propriedades do solo estudadas exibiram diferenças em suas dependências espaciais. Valores de alcance dos semivariogramas variaram de 87m para Ca a 611m para P.

Os valores da proporção $[Co/(Co+C)]$ indicados na Tabela 3 e 4 demonstram diferentes graus de dependência espacial, sugerindo que parte da variabilidade não pode ser explicada para a distância entre pontos amostradas neste trabalho. Caso distâncias menores do que 50 m

tivessem sido contempladas, os semivariogramas experimentais possivelmente apresentariam valores mais baixos de efeito pepita.

Como mencionado em detalhes no item material e métodos desta pesquisa, dois tipos de validação foram efetuados: validação interna, também conhecida por “Jackknife” ou validação cruzada e validação externa.

Os resultados da validação interna, para as dezenove propriedades físico-químicas nas três camadas avaliadas nesta pesquisa, apresentaram (i) erro médio (ME1) bastante próximo de zero, apontando ausências de erros sistemáticos e (ii) valores de quadrado do erro médio (RSME1) próximos de um, indicando bons ajustes dos modelos aos dados dos semivariogramas experimentais (dados não mostrados).

Todavia, o processo de validação interna é limitado, uma vez que somente valida os modelos ajustados aos semivariogramas em relação aos seus dados originais (conjunto com 90% dos dados totais).

Portanto, foram calculados no presente estudo, um segundo erro médio (ME2) e também um segundo quadrado do erro médio (RMSE2), conforme Bourennane et al. (1996). Os resultados desses dois índices para cada um dos atributos do solo nas três profundidades estudadas são mostrados nas Tabela 5 e 6.

Tais índices foram calculados através da comparação das diferenças entre os valores estimados pela krigagem pontual (para os 10% dos dados retirados da análise variográfica) com os valores dos 10% dos dados efetivamente medidos no campo, mas que não foram utilizados em nenhuma etapa da análise semivariográfica.

Em geral, as propriedades físicas e químicas do solo nas três profundidades avaliadas mostraram valores de ME2 bastante baixos (Tabelas 5 e 6). Os resultados negativos de ME2, apresentados nessas tabelas indicam que os valores preditos subestimaram aqueles observados no campo.

As interpretações dos valores RMSE2 dão uma noção geral da precisão média das predições efetuadas pela krigagem ordinária em comparação com os dados efetivamente medidos no campo.

Tabela 5. Erro médio e raiz quadrada do erro médio obtidos pelo procedimento de validação externa para densidade, granulometria, acidez e macronutrientes do solo.

Profundidade	Erro Medio	Raiz quadrada do erro medio
<u>Densidade</u>		
0-10	0,130	1,269
10-20	-0,343	1,565
20-30	-0,344	1,564
<u>Argila</u>		
0-10	-0,519	0,999
10-20	-0,165	1,008
20-30	0,071	0,611
<u>Areia</u>		
0-10	0,550	1,073
10-20	0,235	0,896
20-30	-0,144	0,600
<u>pH (H2O)</u>		
0-10	0,416	1,576
10-20	0,123	1,168
20-30	-0,087	0,985
<u>pH (CaCl)</u>		
0-10	0,004	1,285
10-20	0,284	1,009
20-30	-0,083	0,850
<u>H+Al</u>		
0-10	-0,022	1,160
10-20	-0,168	0,881
20-30	0,097	0,772
<u>Ca</u>		
0-10	0,165	1,025
10-20	0,337	1,178
20-30	-0,043	0,707
<u>Mg</u>		
0-10	-0,471	1,263
10-20	-0,155	1,088
20-30	-0,275	1,265
<u>V%</u>		
0-10	0,262	1,545
10-20	0,399	1,059
20-30	-0,080	0,580
<u>K</u>		
0-10	-0,253	1,117
10-20	0,196	0,805
20-30	-0,074	0,872
<u>P</u>		
0-10	0,100	1,087
10-20	-0,064	0,807
20-30	0,389	0,724

Tabela 6. Erro médio e raiz quadrada do erro médio obtidos pelo procedimento de validação externa para carbono, nitrogênio e micronutrientes do solo.

Profundidade	Erro Medio	Raiz quadrada do erro medio
<u>N</u>		
0-10	-0,119	0,995
10-20	0,298	0,880
20-30	-0,098	1,046
<u>C</u>		
0-10	0,161	1,190
10-20	0,310	0,833
20-30	-0,027	0,850
<u>Cu</u>		
0-10	-0,219	1,114
10-20	-0,061	0,959
20-30	-0,041	0,910
<u>Fe</u>		
0-10	0,167	1,211
10-20	0,138	0,805
20-30	-0,151	1,577
<u>Mn</u>		
0-10	0,232	0,907
10-20	0,174	0,983
20-30	0,040	1,369
<u>Zn</u>		
0-10	-0,334	1,121
10-20	-0,672	1,788
20-30	-0,091	1,376

Considerando então, que de forma geral, as análises semivariográficas de todos os atributos físico e químicos do solo para as três camadas investigadas apresentaram resultados satisfatórios com erros médio próximo de zero, foi realizada a interpolação por krigagem em blocos, dos 100% dos dados obtidos nesta pesquisa.

A krigagem em blocos utilizada no presente estudo é uma técnica interpolativa de estimativa baseada em minimização da variância do erro e por isso, é considerada por vários autores (BURGESS & WEBSTER, 1980; TRANGMAR et al., 1985; JOURNAL & ROSSI, 1989; OLIVER & WEBSTER, 1991; ROBERTSON et al., 1997; BOURENNANE et al., 2003 dentre outros) como bastante adequada para a geração de mapas.

Como resultados das interpolações por krigagem em blocos (blocos com 50 m de raio), foram obtidos 57 mapas das distribuições espaciais das dezenove propriedades do solo em cada uma das três camadas amostradas

O número total de mapas é bastante grande e torna-se inviável apresentá-los um a um neste documento. Todavia, para ilustrar os produtos desta parte da pesquisa, as Figuras 24, 25, 26 mostram os mapas das variáveis P, K e V% para as camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade do solo. As legendas dos mapas estão de acordo com os limites de interpretação de teores do Boletim 100 (IAC,1996).

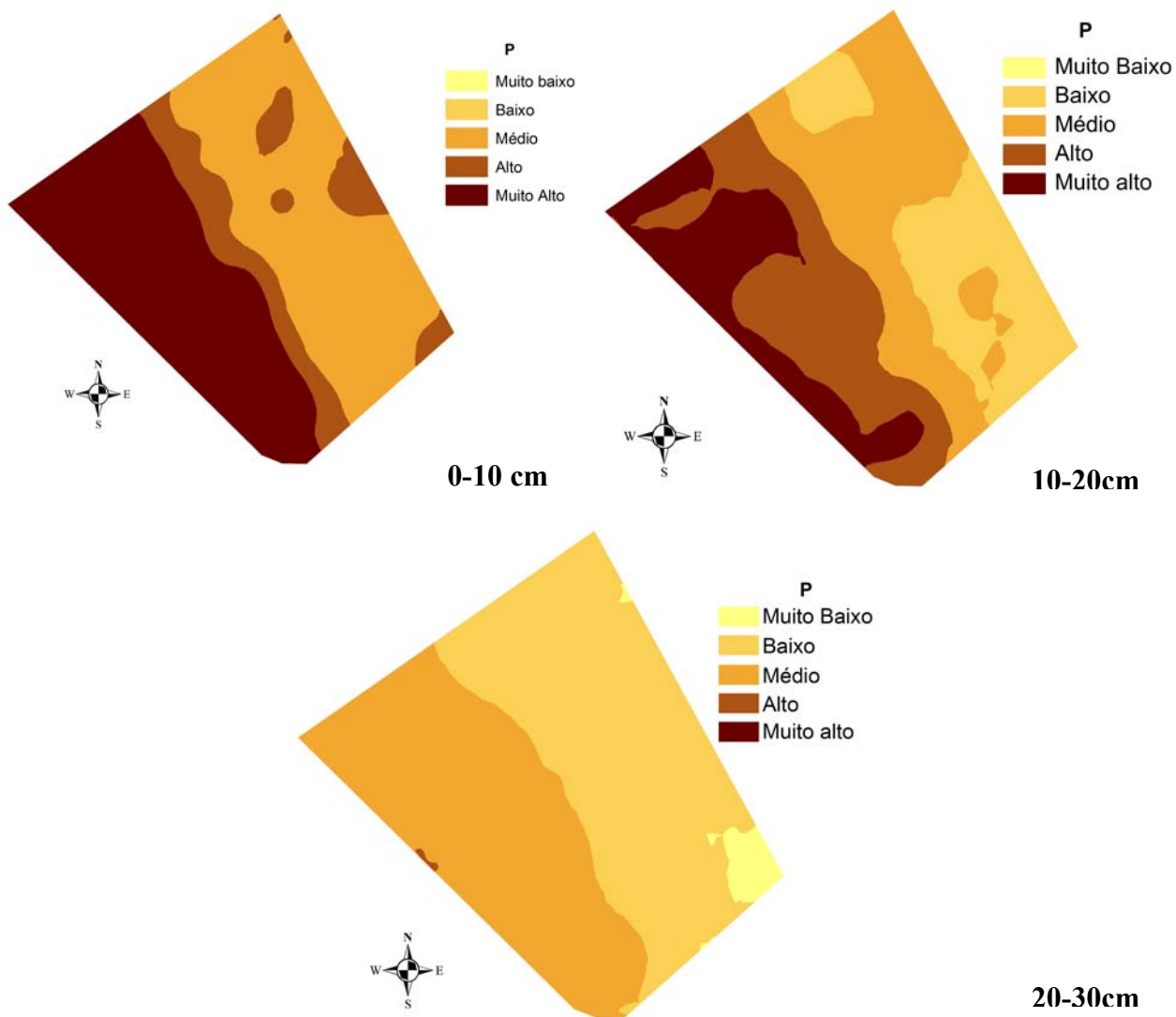


Figura 24. Mapas da variabilidade espacial do atributo fósforo (P) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).

Observa-se pela Figura 24 uma tendência de valores mais elevados de P na região oeste e sudoeste da área analisada, coincidindo com as áreas mais elevadas da topografia (Figura 6). Estudos mais aprofundados como por exemplo de pedologia e histórico do uso da terra, poderiam explicar a origem dessa variabilidade. O mesmo fato foi observado com relação ao K (Figura 25).

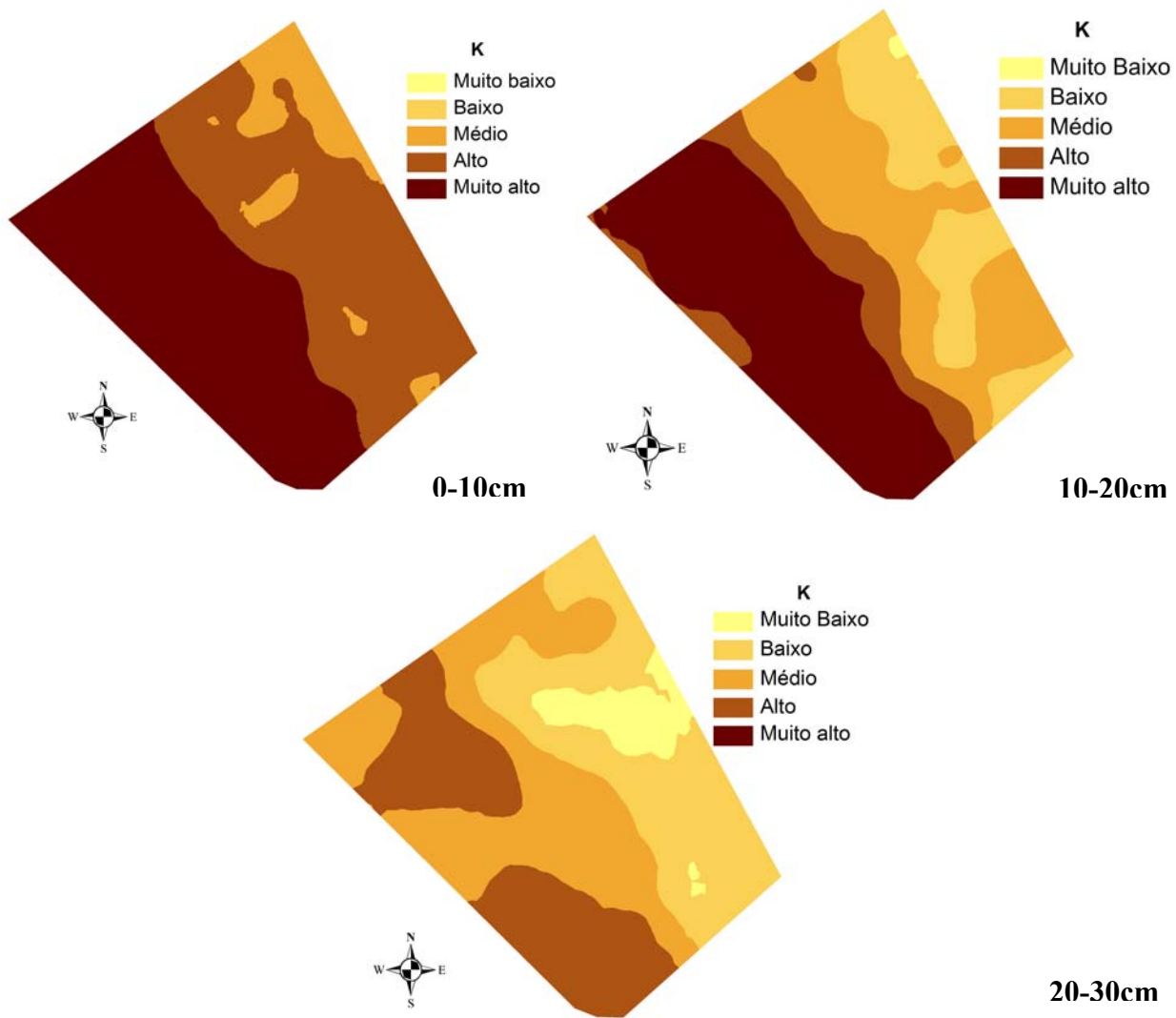


Figura 25. Mapas da variabilidade espacial do potássio (K) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).

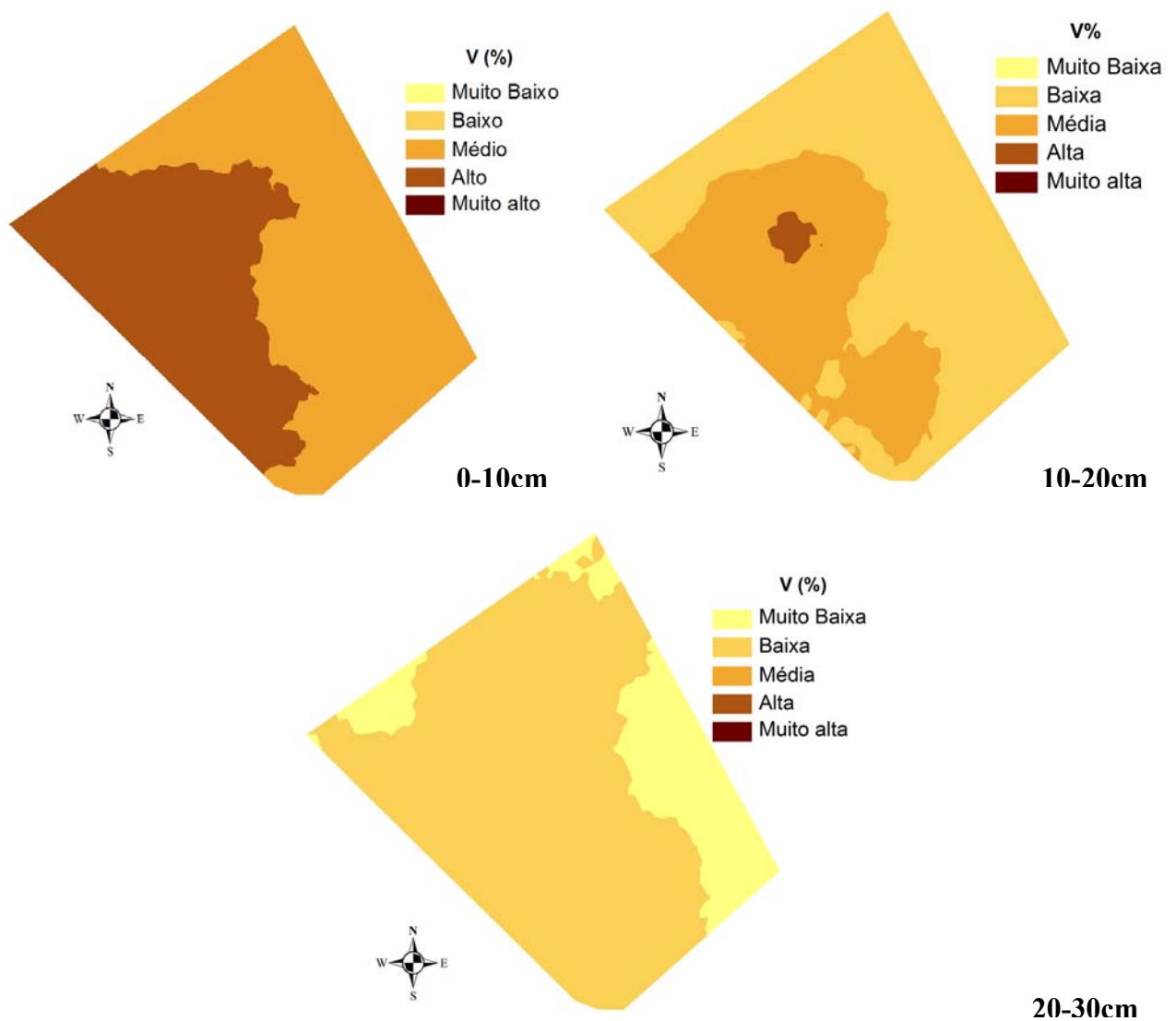


Figura 26. Mapas da variabilidade espacial do índice de saturação em base (V%) das camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos (IAC, 1996).

A seguir e a título de ilustração serão apresentados as Figuras 27 e 28 referentes aos mapas da variabilidade espacial da densidade do solo, granulometria, acidez, N, C e os demais macro e micronutrientes para a camada 0-10 cm.

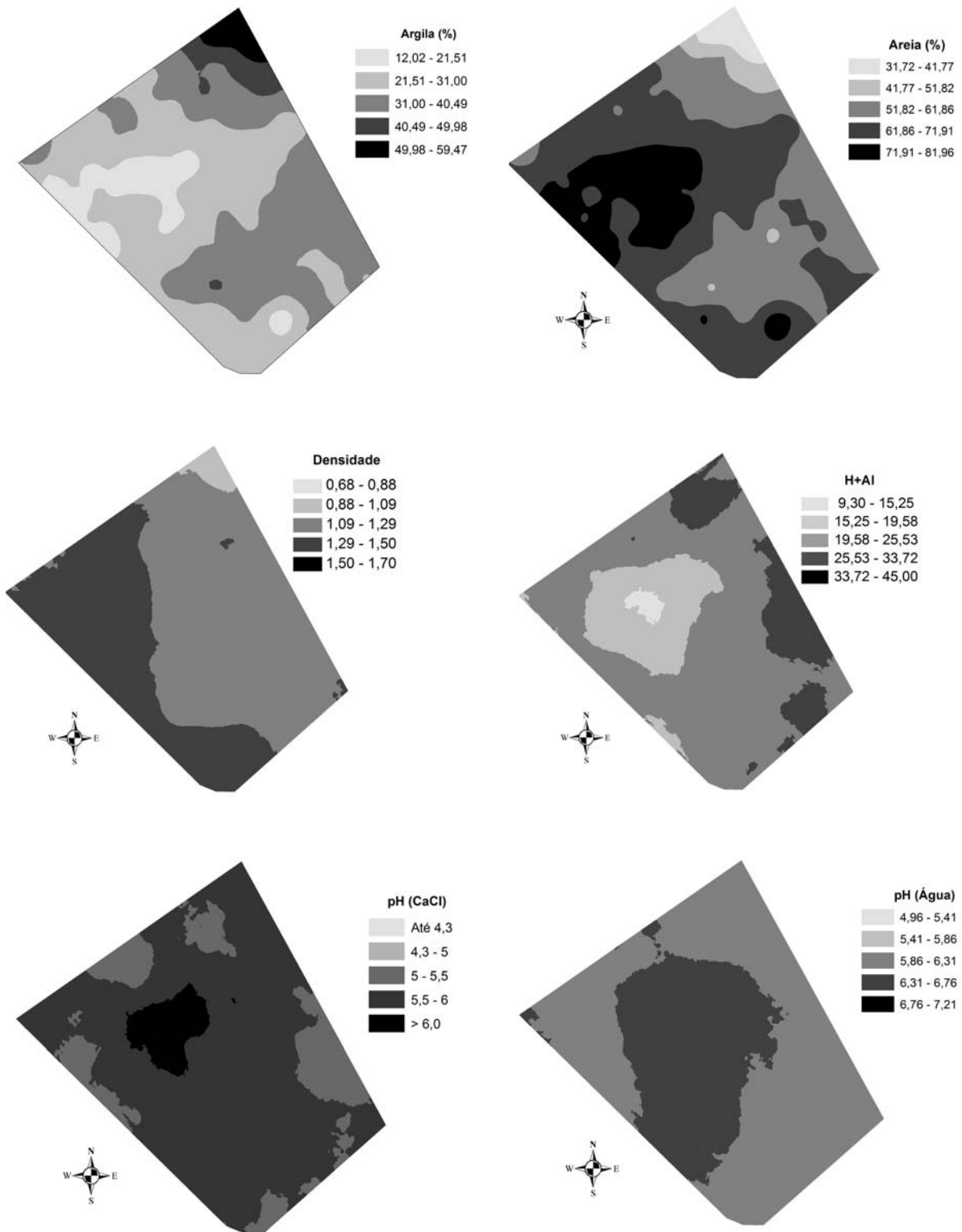


Figura 27. Mapas da distribuição espacial da granulometria, densidade e acidez relativos a camada 0-10 cm (IAC, 1996).

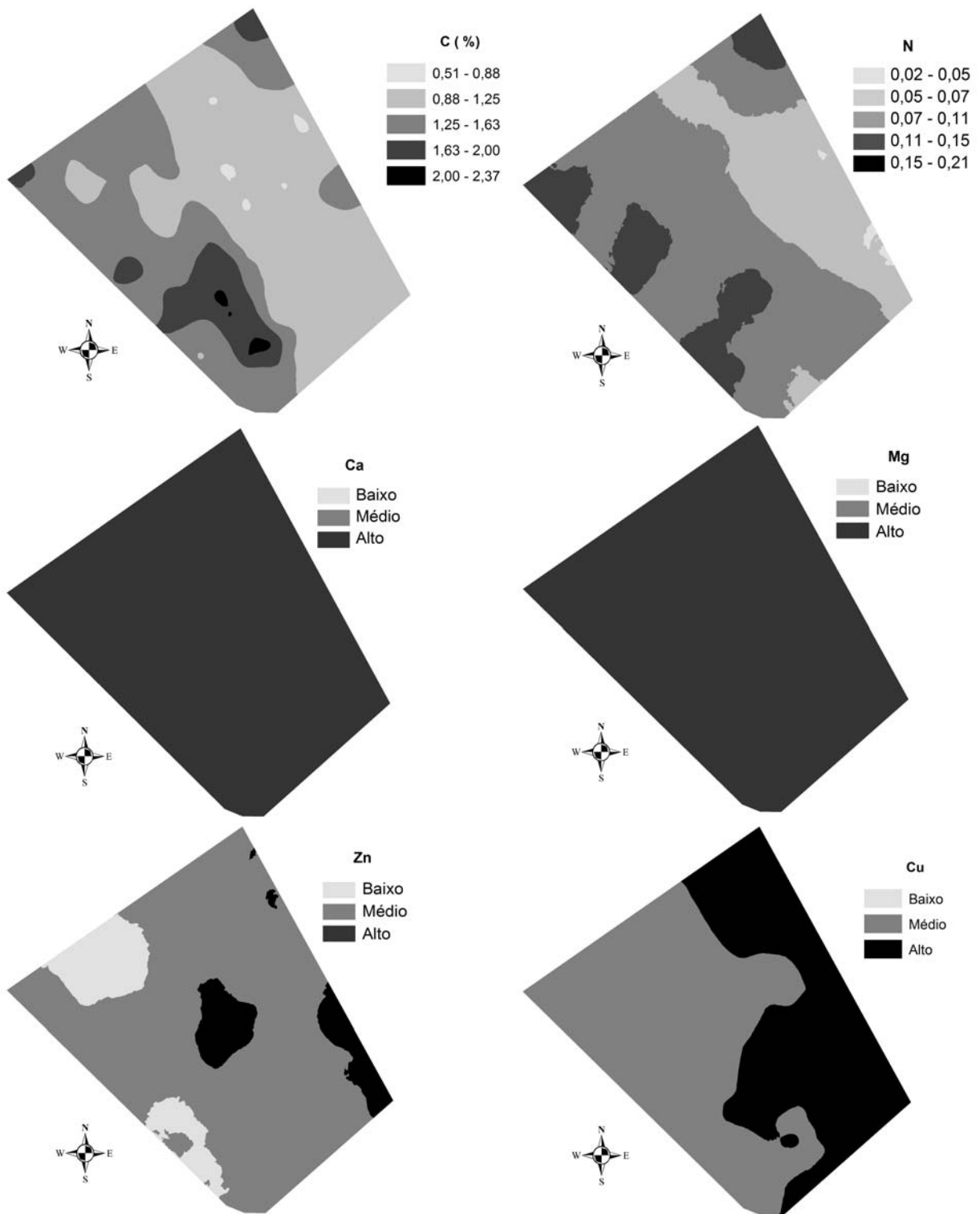


Figura 28. Mapas da distribuição espacial do carbono (C), nitrogênio (N), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), cobre (Cu) relativos à camada 0-10 cm (IAC, 1996).

4.5.1.3 Compactação do solo.

O mesmo procedimento geoestatístico descrito no item 4.5.1.2 foi adotado para a confecção do mapa de compactação. Os índices de resistência a penetração de cada local avaliado foram obtidos por meio gráfico, que relacionam resistência (MPa) em função da profundidade.

A Figura 29 mostra o mapa de resistência a penetração da camada que apresentou maiores índices (20-30 cm).

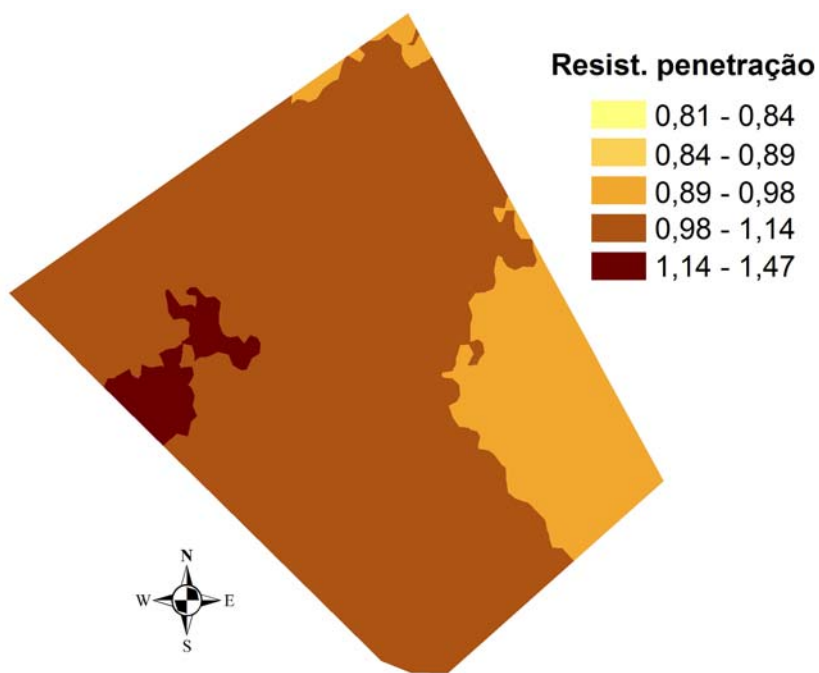


Figura 29 Mapas de resistência a penetração (MPa) na camada de 20-30 cm.

Verificou-se que a camada 20-30cm apresenta maior índice de resistência a penetração (Figura 29). Após análise de correlação linear, observou-se que apesar de não serem significativos (0,01 a 0,33) que há uma tendência dos índices de resistência a penetração estarem mais relacionados com os teores de argila (0,29) e relevo (0,33) do que com os demais atributos analisados.

4.5.2. Segunda coleta

Conforme mencionado anteriormente a análise da variabilidade espacial dos macronutrientes, N, C, pH em H₂O e CaCl, V%, CTC e resistência a penetração (R.P.) foi efetuada utilizando 100% dos resultados analíticos. As etapas relativas à estatística descritiva clássica e análise semivariográfica seguem os mesmos procedimentos descritos em detalhes no item 4.5.1.

4.5.2.1 Estatística descritiva clássica

A Tabela 7 contém os resultados da estatística descritiva para os atributos físicos e químicos analisados nessa segunda amostragem.

Pode-se verificar que algumas das variáveis apresentam número de observações (**n**, na Tabela 7) inferiores que as demais. Um exemplo desse procedimento pode ser observado para o P na camada 10-20cm, em que 5 valores foram considerados discrepantes (Tabela 7).

Avaliando se os valores de média e mediana para cada variável estudada e em cada profundidade nota-se que tais valores são similares. Exceção ocorre para a variável P, que se explica pela grande amplitude dos dados (valores máximos e mínimos na Tabela 7).

Os valores de coeficiente de variação (CV) apresentados nas Tabela 7 variam desde 4,17 para pH em água na camada 0-10 cm de profundidade até 91,31 para as concentrações de P para mesma camada.

Tabela 7. Estatística descritiva para os 100% dos dados nas camadas amostradas.

Propriedade	<i>n</i>	Média	Mediana	DP	CV	Mín.	Máx.	Curt	Assime
<i>Camada 0-10 cm</i>									
pH (H2O)	46	6,10	6,12	0,25	4,17	5,30	6,57	1,24	-0,47
pH (CaCl)	46	5,58	5,64	0,43	7,80	4,68	6,30	-0,99	-0,10
N	46	0,09	0,09	0,02	19,93	0,05	0,13	-0,19	0,40
C	46	1,33	1,28	0,25	18,86	0,75	1,89	-0,02	0,19
R.P.	46	0,73	0,67	0,41	56,09	0,14	1,83	0,08	0,81
P	46	28,70	20,00	26,20	91,31	4,00	115,00	5,00	2,37
K	46	1,33	1,05	0,71	53,00	0,40	3,30	1,53	1,36
Ca	46	27,89	27,50	10,51	37,69	7,00	55,00	-0,02	0,28
Mg	46	11,41	11,00	4,19	36,69	4,00	21,00	-0,56	0,21
H+AL	46	27,48	26,50	6,77	24,66	18,00	52,00	2,62	1,19
CTC	46	68,11	66,95	11,44	16,79	45,50	94,00	-0,34	0,03
V%	46	58,28	60,50	13,34	22,89	20,00	79,00	0,64	-0,87
<i>Camada 10-20 cm</i>									
pH (H2O)	46	6,05	6,14	0,32	5,36	5,38	6,77	-0,36	-0,34
pH (CaCl)	46	5,38	5,42	0,57	10,56	4,36	6,36	-1,16	-0,08
N	46	0,08	0,08	0,01	17,57	0,06	0,11	-0,95	-0,08
C	46	1,20	1,22	0,21	17,73	0,82	1,59	-0,73	0,01
R.P.	46	1,18	1,15	0,40	33,86	0,17	2,05	0,30	0,10
P	41	23,11	18,00	19,02	82,31	3,00	89,00	4,73	2,08
K	46	1,35	1,10	0,75	55,67	0,40	3,20	0,32	0,98
Ca	46	23,80	23,00	12,36	51,90	4,00	59,00	0,07	0,47
Mg	46	11,13	10,00	5,41	48,57	3,00	25,00	-0,11	0,63
H+AL	46	30,93	28,00	9,23	29,84	16,00	52,00	-0,22	0,63
CTC	46	67,22	68,05	12,79	19,03	37,00	101,00	0,61	0,22
V%	46	51,72	54,00	17,87	34,55	16,00	84,00	-0,86	-0,30

4.5.2.2 Análise semivariográfica.

Em geral os semivariogramas construídos para os doze atributos das duas camadas de solos amostradas, mostraram-se fracamente estruturados e apresentaram elevados valores de efeito pepita (Tabela 8). A proporção $[Co/(Co+C)]$ apresentou valores bastante elevados, sugerindo que grande parte da variabilidade não é explicada pelos parâmetros mostrados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas da segunda amostragem.

Profundidade	Modelo	Efeito pepita (Co)	Patamar (C+Co)	Alcance Ao	Proporção Co/(C+Co)
(cm)		(unidade) ²		(m)	(%)
<u>pH (H2O)</u>					
0-10	esférico	0,060	0,066	503	91
10-20	esférico	0,068	0,134	919	51
<u>pH (CaCl)</u>					
0-10	esférico	0,174	0,204	1045	86
10-20	esférico	0,227	0,399	919	57
<u>H+Al</u>					
0-10	esférico	37,81	47,752	481,26	79
10-20	esférico	37,663	47,985	495,91	78
<u>Ca</u>					
0-10	esférico	98,55	121,10	987	81
10-20	esférico	134,17	167,35	919	80
<u>Mg</u>					
0-10	esférico	16,85	17,61	338	96
10-20	esférico	26,65	29,28	158	91
<u>V%</u>					
0-10	esférico	166,59	180,803	500	92
10-20	esférico	269,37	339,955	650	79
<u>K</u>					
0-10	esférico	0,49746	0,49746	500	100
10-20	esférico	0,40733	0,57143	187	71
<u>P</u>					
0-10	esférico	82,48	118,03	550	70
10-20	exponencial	40,12	108,22	919	37
<u>N</u>					
0-10	esférico	0,00011	0,00035	476	33
10-20	esférico	0,00011	0,00022	457	52
<u>C</u>					
0-10	esférico	0,0168	0,0706	419	24
10-20	esférico	0,0203	0,0501	424	40
<u>Compactação</u>					
0-10	esférico	0,0963	0,1728	298	56
10-20	esférico	0,0889	0,1758	303	51
<u>CTC</u>					
0-10	esférico	98,916	134,275	378	74
10-20	esférico	114,52	165,641	212	69

Diferenças nas variabilidades espaciais dos atributos do solo pode ser de origem natural (intrínseca) e/ou causadas por praticas de manejo. Esse segundo fator poderia explicar parcialmente os elevados valores de efeito pepita mostrados na Tabela 8, uma vez que a segunda amostragem foi efetuada após adubação nitrogenada e potássica. Considerando que as variáveis Ca e Mg não apresentaram forte dependência espacial nos semivariogramas da primeira amostragem e considerando ainda que os fertilizantes adicionados podem ter interagido com outros variáveis avaliadas nessa segunda amostragem, sugere-se que tais fatores possam ser os causadores do efeito pepita verificado.

Os mapas das variabilidades espaciais dos atributos P, K e V% relativos a segunda amostragem podem ser observados nas Figuras 30, 31 e 32.

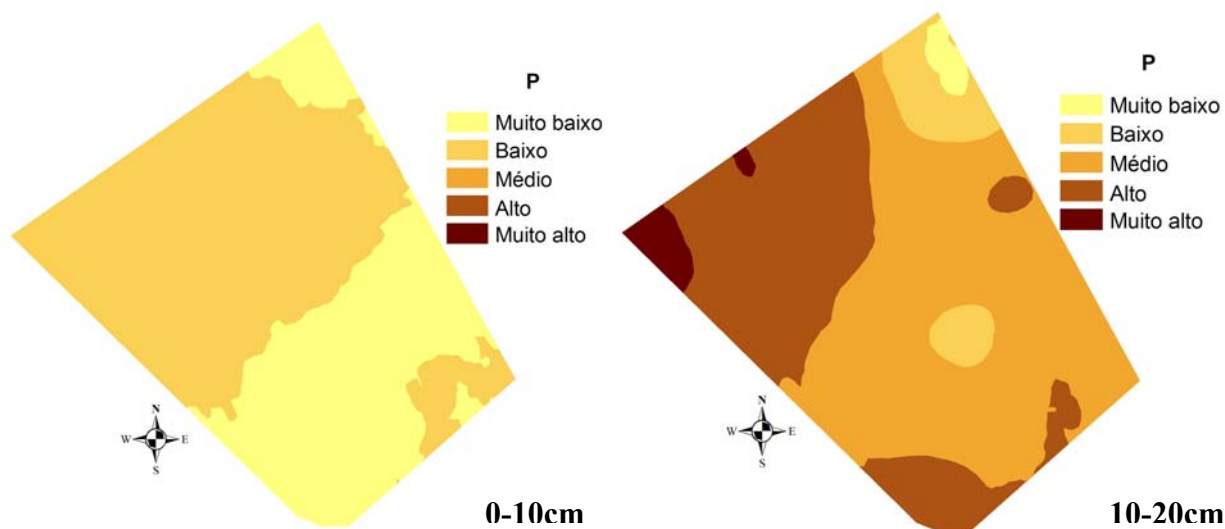


Figura 30. Mapas da variabilidade espacial do atributo fósforo (P) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.

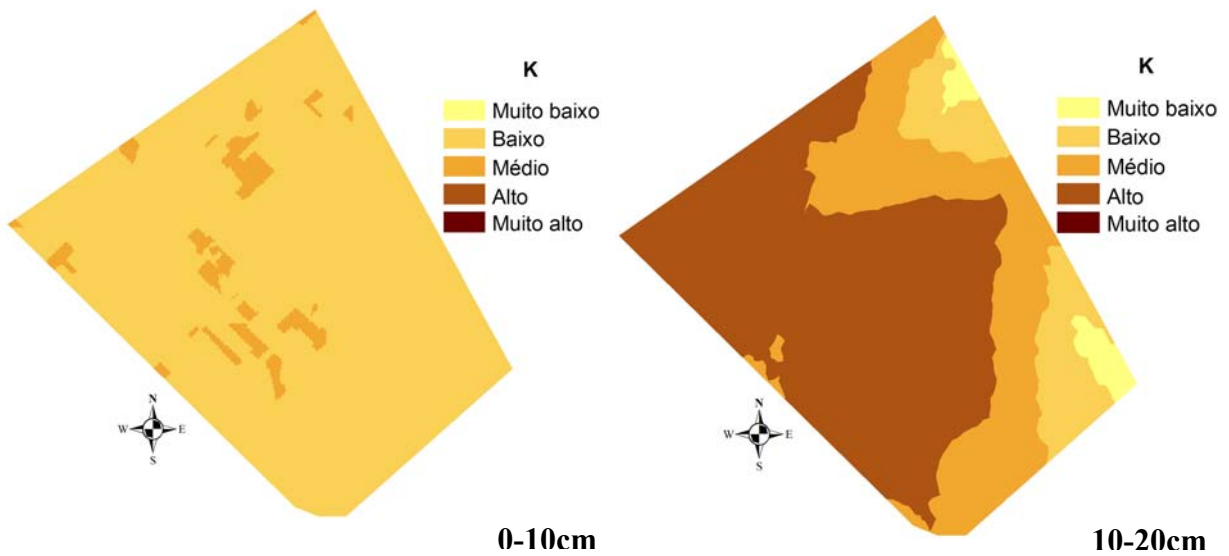


Figura 31. Mapas da variabilidade espacial do potássio (K) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.

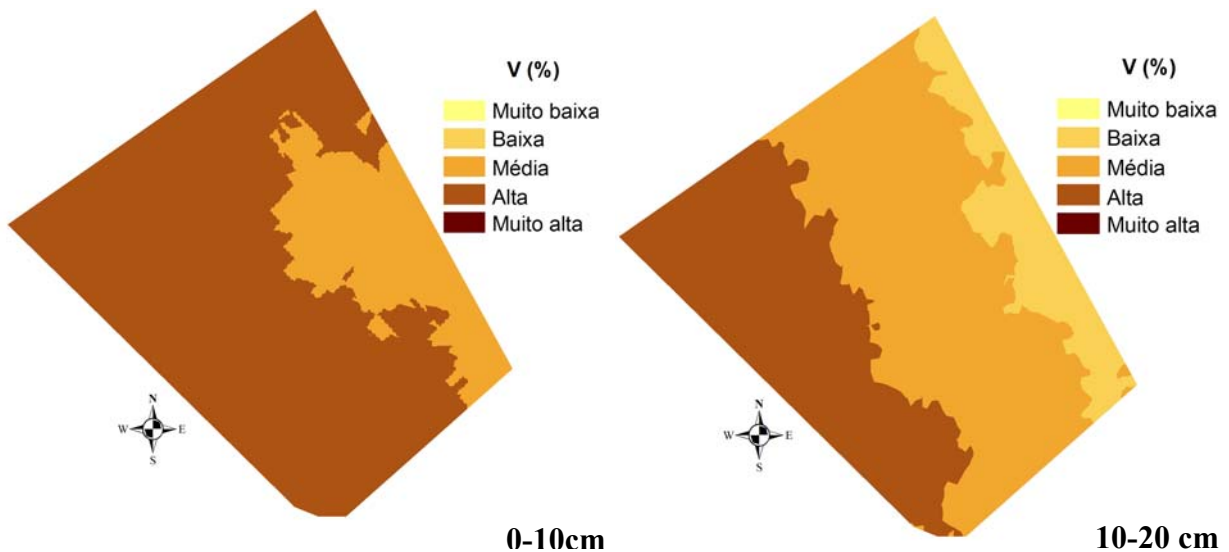


Figura 32. Mapas da variabilidade espacial do índice de saturação em base (V%) das camadas 0-10 e 10-20 cm do solo obtidos pelo método de krigagem em blocos.

Análise dos mapas de variabilidade espacial do P, K e V% mostram que os dois primeiros apresentam concentrações maiores na camada 10-20 em relação à de superfície. O índice de saturação em bases é maior em superfície provavelmente, devido a maior concentração de matéria orgânica nessa camada.

4.5.2.3 Compactação do solo.

O mesmo procedimento descrito no item 4.5.2.2 foi adotado para a confecção do mapa de compactação.

A Figura 33 mostra o mapa de resistência a penetração da camada que apresentou maiores índices (10-20 cm). Verifica-se que as regiões sul e sudoeste da área são locais onde uma possível camada de compactação pode existir, por oferecerem uma resistência a penetração na ordem de 1,1 a 2 MPa.

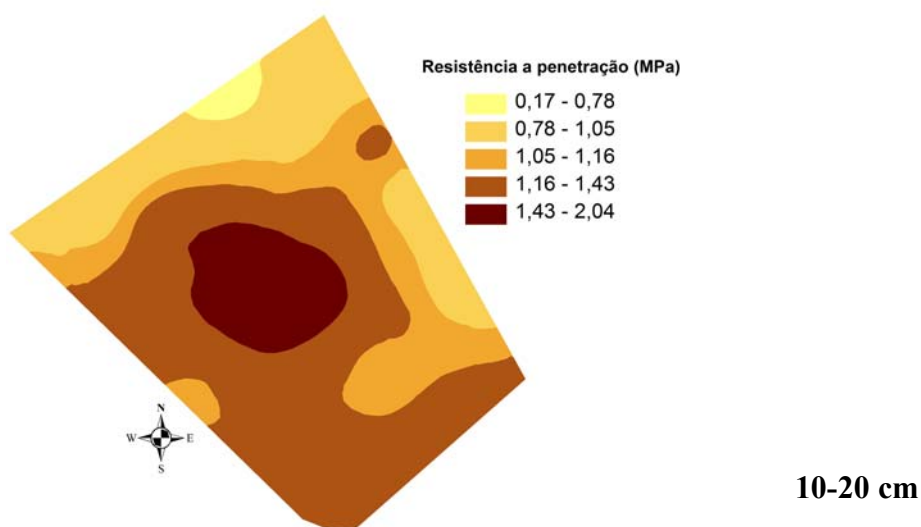


Figura 33. Mapa de resistência à penetração para a camada 10-20 cm do solo.

4.6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa mostrou que apesar do aparente aspecto homogêneo da área de estudo, foi possível verificar a existência de uma importante variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo na área de 42 ha com cana-de-açúcar.

Os resultados da análise semivariográfica indicam que as propriedades do solo avaliadas possuem dependência espacial distintas. Assim como apontado em outros estudos, os resultados apresentados nesta parte da pesquisa evidenciam que a variabilidade espacial de alguns atributos do solo devem ser levada em consideração, por exemplo, em Agricultura de Precisão .

5. CORRELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

5.1 RESUMO

Este trabalho teve como objetivo mapear a produtividade da cultura cana-de-açúcar utilizando a carga dos veículos de transbordo pesado em campo e os atributos físicos e químicos do solo a fim de efetuar uma possível correlação entre tais variáveis. Para realização do mapeamento de produtividade, como não se dispunha de um equipamento para medir a produtividade da cultura instalado na colhedora, optou-se por medir a carga dos veículos de transbordo, utilizando-se uma balança apropriada para medir o peso de veículos de dois eixos e quatro rodas. Esses dados, juntamente com as informações obtidas por um Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) instalado na colhedora, que registrava o início e o final da localização da colhedora para cada carga de transbordo, permitiram a elaboração de um mapa digital que representa a superfície de produção para a área de 42 ha colhida. Para se determinar as propriedades do solo, amostras foram retiradas no início da safra utilizando-se uma grade regular de 50 x 50 m. Os resultados analíticos dos atributos físicos do solo para as amostras oriundas da grade foram tratados por meio de técnicas de geoestatística e permitiram verificar sua correlação com a produtividade da cultura por meio de uma correlação linear. Os resultados obtidos permitiram concluir que a metodologia empregada para obter o mapa de produtividade da cultura de cana-de-açúcar apresentou falhas que dificultaram a confecção de um mapa que representasse com maiores detalhes os diferentes rendimentos da cultura na área avaliada. As correlações entre produtividade e atributos físicos e químicos do solo apresentaram baixos valores. Os maiores índices de correlação ocorreram para as variáveis altitude (-0,47%), teor de argila (0,51%) e cobre (0,55).

5.2 ABSTRACT

This study work had as objective to map the yield of sugarcane crop by using the heavy wagon's load in the field and the physical and chemical attributes of soil in order to obtain a possible correlation among such variables. To perform the yield mapping, as there was not an equipment available to measure the crop yield attached to the harvester, the transportation truck's load was measured by means of using a scale adequate to measure the weight the

weight of truck with two and four wheels. These data, together with the information obtained by a Differential Global Positioning System (DGPS) installed in the harvester. It recorded the beginning and the end of the harvester positioning for each load, allowing, therefore, the elaboration of a digital map which represents the surface of production for the 42ha area harvested. In order to determine the soil properties, samples were collected at the beginning of the harvest by using a regular grid of 50 x 50 m. The analytical results of the physical attributes of soil for those samples collected from the grid were treated by means of geostatistics, which permitted verification of its correlation with the crop yield by means of a linear correlation. The results obtained permitted to conclude that the methodology used for obtaining the yield map for the sugarcane culture presented failures that made the elaboration of a map, which represented more detailed yields of the culture in the evaluated area, difficult. The correlations between the yield and the physical and chemical attributes of soil presented low values. The highest correlation indices occurred for the latitude variables (- 0.47%), clay rate (0.51%), and copper (0.55).

5.3 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de se produzir mais a menor custo, sem grandes prejuízos sociais e ambientais tem demandado do setor agrícola a busca por maior eficiência e novas técnicas de manejo, para melhor controle das informações de campo. Uma dessas novas técnicas é a Agricultura de Precisão (AP), a qual já está sendo aplicada em países tecnologicamente mais avançados como os Estados Unidos, Canadá e os Europeus (CERRI & BALASTREIRE, 2002).

Balastreire (1998b) apresenta o potencial de utilização dos conceitos de AP na cultura de cana-de-açúcar e ressalta entre os principais benefícios: a) possibilitar a redução da poluição ambiental, tema importante, onde cada vez mais se busca uma agricultura sustentável; b) proporcionar benefícios econômicos, onde as reduções do custo final do produto podem ser obtidas retirando-se os insumos de pontos de menor potencial de produção e redirecionando-os para pontos de maior potencial; e c) melhorar a produtividade, com aumento desta e/ou aumento da quantidade de açúcar disponível na cana.

Apesar de a AP preconizar o potencial de redução de aplicação de defensivos, e possível melhora na produtividade da cultura como sendo os benefícios da aplicação desta técnica, observamos que diversos trabalhos encontrados na literatura (VIANA DA MATA et

al., 1999; YANAI et al., 2001; VIEIRA e MOLIN, 2001) relatam baixa correlação entre fertilidade do solo e produtividade da cultura.

Lütticken et al. (1997) obtiveram em seus estudos coeficientes de correlação bastante baixos entre os teores de nutrientes no solo e o rendimento das culturas, somente a matéria orgânica apresentou influência significativa em 4 de 24 talhões estudados.

Freitas et al. (2002) acompanharam um talhão de 22 ha ao longo de três ciclos da cultura da soja, onde foi monitorada e caracterizada a variabilidade espacial tanto da produção como dos componentes e fatores de produção, os quais potencialmente interferem na variabilidade de produção. Os autores concluíram que a produtividade da soja correlacionou positivamente com os teores de areia e argila e negativamente com altura de planta, população de plantas por área, ocorrência de nematóides e concentração de cálcio e potássio no solo.

Molin et al. (2002) com o objetivo de analisar as possíveis relações das manchas da produtividade da cultura do café com as variações na fertilidade do solo, correlacionaram o mapa de produtividade do café com os mapas dos componentes de fertilidade química do solo e obtiveram baixos valores de correlação.

No Brasil, para a cultura da cana-de-açúcar, existem poucas informações a esse respeito e por isso há necessidade de se realizar essas correlações. Uma das principais razões é a inexistência de um monitor de produtividade desenvolvido para este tipo de cultura. No subsistema de colheita mecanizada, Pierossi & Hassuani (1997) na tentativa de produzir mapas de rendimento, montaram sobre quatro células de carga de compressão, uma caçamba de balança superior, permitindo, desta forma, a leitura da carga total da caçamba independente da distribuição desta em seu interior.

Saraiva et al. (1999) desenvolveram um dispositivo dinâmico nas carregadoras de cana inteira, com o objetivo de obter a quantidade do produto sendo carregado e posto no caminhão. Durante os testes executados, o sistema apresentou altas oscilações na coleta da produtividade. Estes erros ocorreram durante o movimento do braço mecânico da carregadora quando levantava o feixe de cana para depositá-lo no veículo de carga, fato explicado pelas perturbações e sobrecargas instantâneas no braço da carregadora. Caso o erro permanecesse constante, seria possível estabelecer um fator de correção nos dados obtidos, e este método seria uma alternativa de obter dados de peso para a geração de mapas de produtividade de cana-de-açúcar inteira.

Pagnano e Magalhães (2001) apresentaram um sistema automático de medição da produtividade de cana-de-açúcar quando colhida por colhedoras autopropelidas. O sistema utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo, os quais, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem a elaboração de um mapa digital que representa uma superfície de produção para a área colhida.

No entanto nenhum destes autores utilizou os resultados de produtividade para realizarem uma análise de correlação entre a variação da produtividade e os atributos do solo.

Este trabalho tem como objetivo mapear a produtividade da cultura cana-de-açúcar utilizando a carga dos veículos de transbordo pesado em campo e os atributos físicos e químicos do solo a fim de efetuar uma possível correlação entre tais variáveis.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Área de estudo e base de dados utilizada

O experimento foi conduzido no talhão de cana-de-açúcar 42ha, da Fazenda Santa Maria, pertencente à Usina São João Açúcar e Álcool, localizada no município de Araras – SP. As coordenadas geográficas são: 22° 23' 20" S (coordenada UTM 7522062 m) e 47° 27' 04" W (coordenada UTM 247620 m), elipsóide WGS84. Os dados dos atributos físicos e químicos do solo da primeira amostragem utilizados nesta pesquisa, já foram apresentados em detalhes no item 4.5.1 desta tese.

5.4.2 Mapeamento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar

A elaboração do mapa que representa a superfície de produção da área colhida, foi obtida utilizando-se o método de pesagem dos transbordos, juntamente com um auxílio do DGPS.

A cana-de-açúcar depois de colhida era transferida para um conjunto composto por um transbordo dianteiro e outro traseiro, tracionado por um trator. Na colhedora foi instalado um equipamento de DGPS com correção em tempo real, composto por um receptor-base GPS da marca Ashtech, com 8 canais, um receptor móvel de 8 canais, da marca Ashtech, modelo

AgNavigator, integrado a um microcomputador dedicado, baseado em um microprocessador Cyrix 486 de 66MHz; um rádio da base com 35 W de potência e um rádio móvel com 2 W de potência, ambos da marca Pacific Crest., (Figura 34) onde se registravam o início e o final do processo de colheita e transferência para cada transbordo.

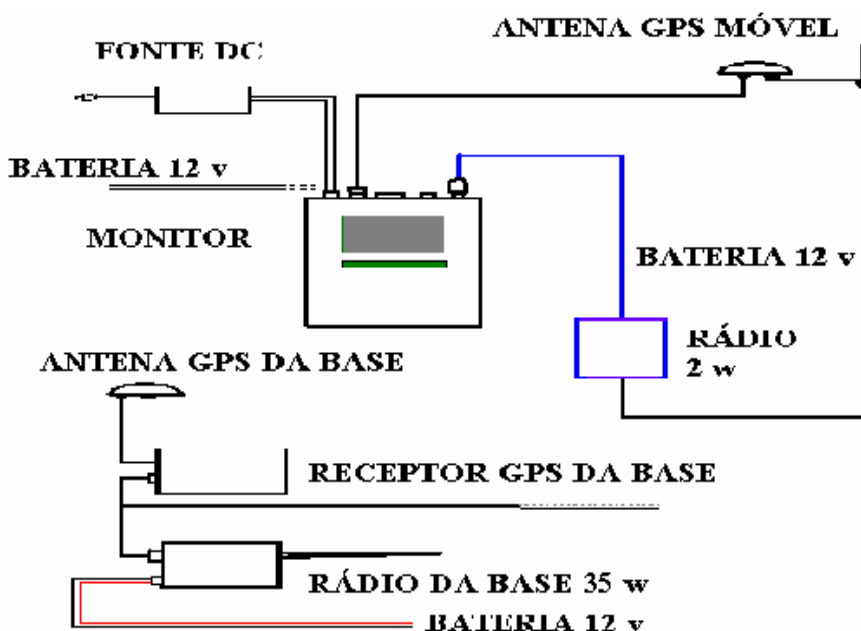


Figura 34. Esquema do DGPS utilizado

Cada conjunto de transbordo utilizado no ensaio foi pesado inicialmente vazio para se obter a tara. O conjunto depois de preenchido com cana era pesado, utilizando uma balança da marca VESTA modelo 3402A específica, para pesagem de veículos (Figura 35). Para cada pesagem registrava-se o peso do trator e dos dois transbordos. O peso do trator foi utilizado com o intuito de eliminar possíveis erros devido à transferência de peso entre os veículos. Conhecendo-se a tara de cada conjunto e o seu peso depois de cheio, foi possível calcular o peso de cana-de-açúcar colhido.



Figura 35. Pesagem do transbordo utilizando células e carga.

Esses dados foram tabulados em uma planilha Excel juntamente com os dados de latitude e longitude obtidos pelo DGPS e horário do início e do fim do preenchimento de cada transbordo.

Para a realização dos cálculos necessários na elaboração do mapa de produtividade, inicialmente fez-se o mapa de bordadura do talhão. Este mapa foi obtido por meio de pontos de referência fornecidos por um GPS (GeoExplorer III) durante o caminhamento no perímetro do talhão. As coordenadas foram corrigidas por diferencial pós processado, utilizando-se de arquivos de correção obtidos da estação base referencial, da Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP. Esses dados foram exportados para um computador com o auxílio do programa GPS Path Finder Office (da marca Trimble), o qual permitiu finalmente a execução do mapa de bordadura. Este mapa e os dados tabulados no programa Excel, foram exportados respectivamente para o programa de Sistema de Informação Geográfica – ArcGis 8.3 – da ESRI.

A Figura 36 mostra os pontos georreferenciados ao final do processo de colheita e transferência para cada transbordo. As coordenadas dos mapas apresentados a seguir estão representadas em UTM (Universal Transverser Mercatur).

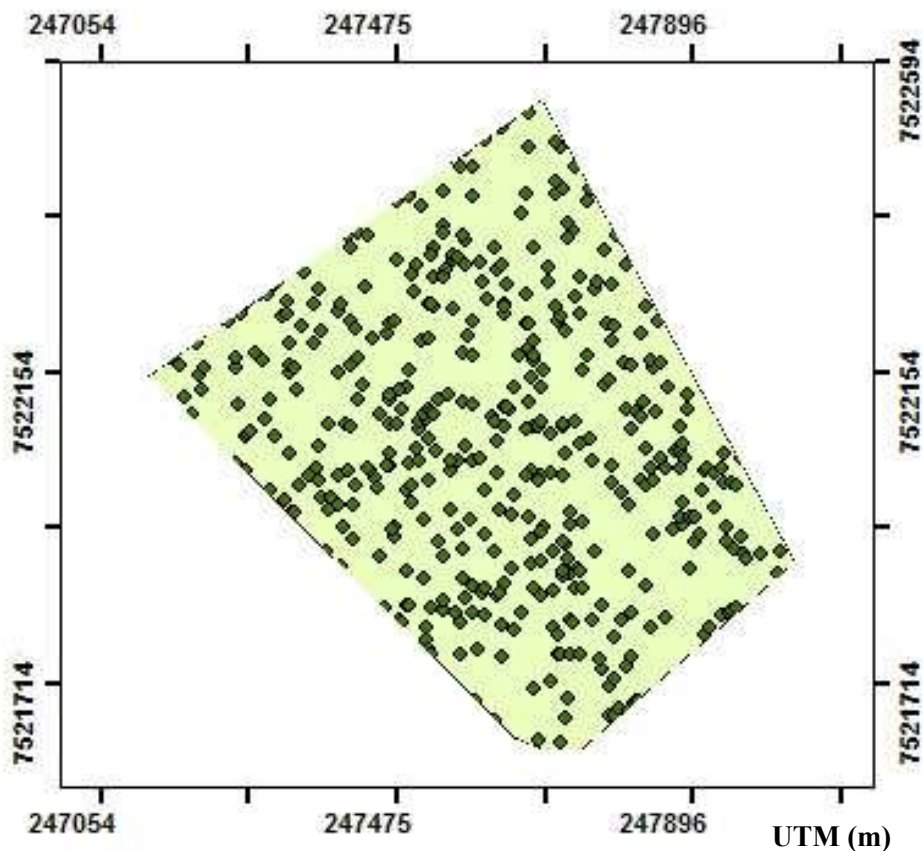


Figura 36. Pontos georeferenciados dos transbordos carregados.

Este procedimento apresentou um erro de coleta nos dados, pois não foram registrados o início e o fim de cada linha de colheita, e/ou o caminho percorrido pela colhedora. Sendo assim, faltou informação sobre o número de linhas colhidas para completar a capacidade de cada transbordo, tornando-se impossível determinar a área colhida referente a cada transbordo e assim, poder representar a produtividade dessa pequena área. Para resolver esse problema, foi necessário criar subáreas dentro da área de estudo e assim, somar-se todos os pontos que se encontravam dentro delas a fim de se obter a sua produtividade. Um mapa das linhas de sulcação (Figura 37) foi usado para auxiliar na identificação da trajetória da colhedora no campo e conseqüentemente, ajudar na criação dessas subáreas (Figura 38).

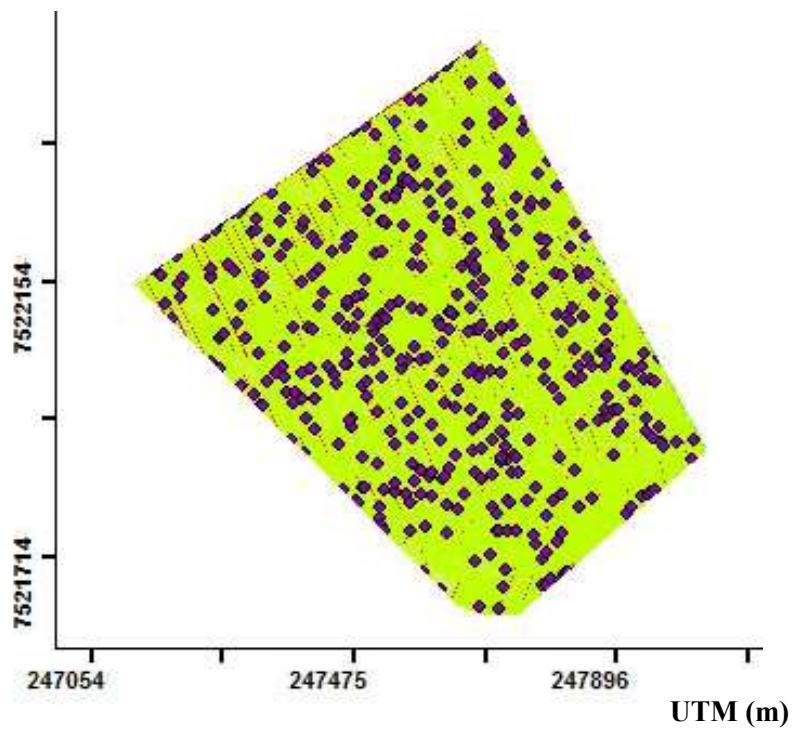


Figura 37. Pontos marcados no mapa de linhas de sulcação da área de estudo.

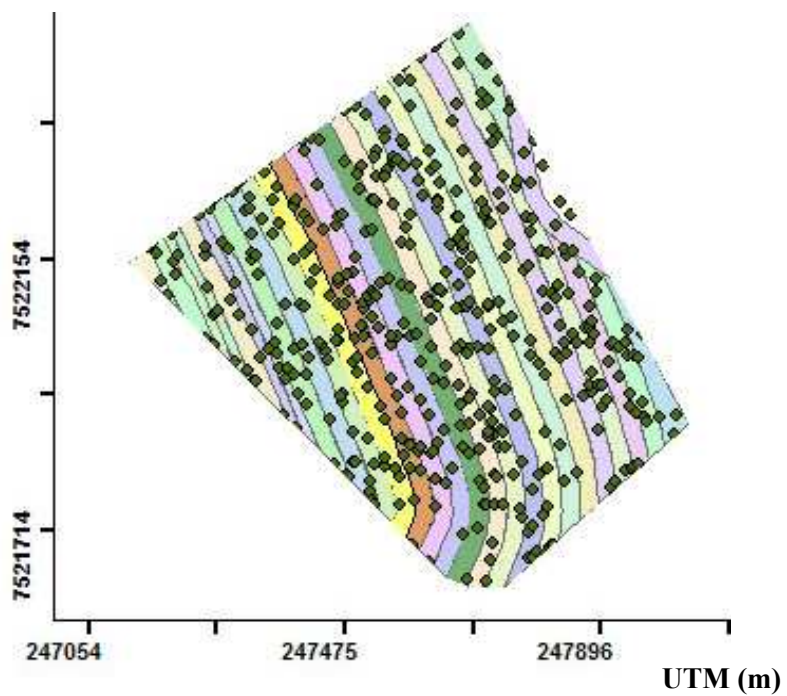


Figura 38. Pontos georeferenciados relativos aos transbordos sob as subáreas criadas dentro da área de estudo.

Essas subáreas como podem ser vistas na Figura 38 são compridas e estreitas seguindo as linhas do talhão e por essa razão diversos pontos (Figura 39) que representam a produtividade dessa pequena área foram criados dentro delas a fim de se poder realizar uma interpolação desses dados.

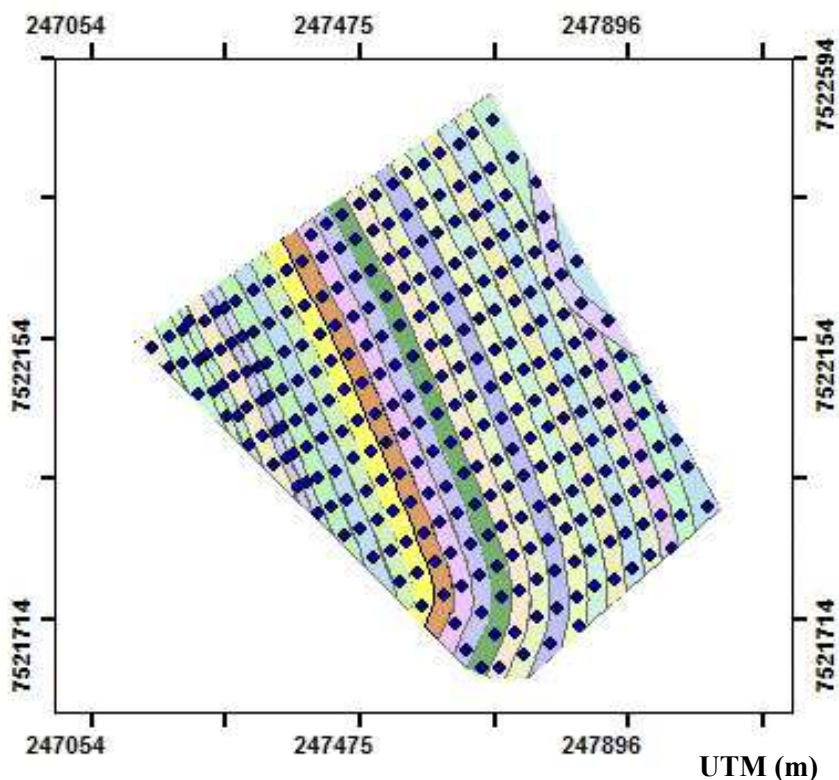


Figura 39. Pontos gerados com a mesma produtividade para cada subárea criada.

Após a interpolação pelo método da krigagem, realizada no programa ArcGis, pôde-se obter o mapa de produtividade para a área de estudo.

5.4.3 Correlação dos dados de produtividade com os atributos físicos e químicos do solo

Para correlacionar a produtividade da cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo foi utilizado o índice de correlação linear, conforme sugerido por Viana da Mata et al., 1999; Yanai et al., 2001; Vieira & Molin, 2001 e Molin et al., 2001. Segundo Iemma (1992) esta ferramenta de análise e suas fórmulas medem a relação entre dois conjuntos de dados em escala para serem independentes da unidade de medida. O cálculo da

correlação da população retorna à covariância de dois conjuntos de dados, dividida pelo produto de seus desvios padrão. A ferramenta correlação também pode ser utilizada para determinar se dois conjuntos de dados movem juntos. Existem três tipos de correlação: Correlação positiva é aquela quando os maiores valores de um conjunto estão associados aos maiores valores do outro; Correlação negativa, quando menores valores de um conjunto estão associados com os maiores valores do outro; e Correlação próxima a zero, quando os valores dos dois conjuntos não se relacionam. Neste contexto, os valores -1 e $+1$ descrevem, respectivamente, a correlação linear perfeita negativa e positiva entre dois conjuntos de dados. O valor zero representa a ausência de correlação linear e os valores próximo de $\pm 0,5$ indicam uma correlação linear moderada, negativa ou positiva, e assim por diante.

O primeiro passo para correlacionar a produtividade da cana-de-açúcar com os parâmetros físicos e químicos do solo (nível de 5% de significância) foi atribuir para cada ponto da malha de amostragem do solo um valor de produtividade. O mapa com a distribuição espacial dos pontos de amostragem de solo foi sobreposto ao de produtividade não interpolado (Figura 39). Para cada ponto de amostragem de solo foi criado um círculo com raio de 25m e para todos os pontos de produtividade contidos nessa área foi calculada uma média. Essa média foi atribuída para cada ponto de amostragem do solo, constituindo uma única planilha com informações sobre a latitude, longitude, altitude, argila, silte, areia, pH (H₂O), pH (CaCl₂), H⁺+Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P, N, C, Cu²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, densidade e produtividade.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Atributos físicos e químicos do solo

Os resultados e os mapas de variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo estão apresentados em detalhe no item 4.5 desta tese.

5.5.2 Mapeamento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar

O mapa interpolado de produtividade da cultura da cana-de-açúcar obtido para área de estudo através do método de pesagem dos transbordos pode ser visto na Figura 40.

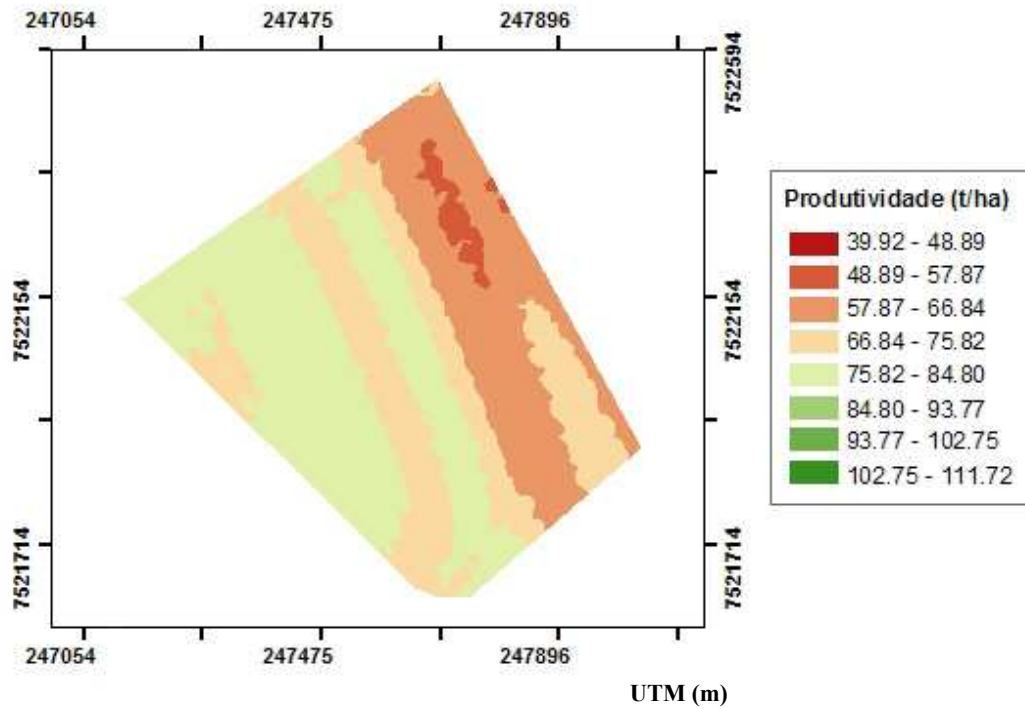


Figura 40. Mapa de produtividade da área de estudo.

Observa-se na Figura 40 que, em função do método empregado para obtenção dos dados de produção na área, esta variou por faixas que acompanham a linha de cultivo da cana-de-açúcar. No entanto, é possível ver regiões de elevada e baixa produtividade bem definidas, mostrando a variabilidade espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

5.4.3 Correlação dos dados de produtividade com os atributos físicos e químicos do solo

As Tabelas 9 e 10 mostram a matriz de correlação linear entre produtividade da cana-de-açúcar, com os atributos físicos e químicos do solo e entre atributos do solo obtida respectivamente, para as camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm.

Analisando as Tabelas 9 e 10 verifica-se que os coeficientes de correlação resultaram em valores baixos ($< 0,5$), confirmando a tendência que vem sendo observada por diversos trabalhos (VIANA DA MATA et al., 1999; YANAI et al., 2001; VIEIRA & MOLIN, 2001).

No entanto, essas baixas correlações não deixam de indicar algumas tendências. O cobre (Cu) apresentou uma correlação linear moderada (em torno de 0,5) com a produtividade para todas as camadas de profundidade. Outros componentes como o H+Al apresentaram um coeficiente de correlação em torno de 0,3, o Manganês (Mn) em torno de 0,25 e o ferro (Fe) para camada de 0 a 20 cm apresentou um coeficiente de 0,2.

A propriedade física argila apresentou um coeficiente de aproximadamente 0,5 ou seja, uma correlação moderada para todas as camadas do solo. Uma vez que a argila evidenciou uma correlação positiva, conseqüentemente a propriedade física areia evidenciou uma correlação negativa da mesma ordem (0,5).

A declividade do terreno revelou uma correlação negativa com a produtividade, apresentando um coeficiente de -0,47. Isso indica que nas áreas menos elevadas do talhão a produtividade é maior. Esta correlação é também observada para a variável densidade, com coeficientes na ordem de -0,3 para profundidade de 20 a 30 cm, indicando uma possível camada de compactação nessa região. A identificação dessa possível camada de compactação também é observada quando se utiliza os índices de resistência a penetração, os quais indicam que os maiores valores encontrados estão localizados na camada 20-30cm. O coeficiente de correlação para resistência a penetração em relação à produtividade, embora de baixo valor, foi de -0,21.

Correlações negativas também ocorreram para as propriedades químicas de P e K, porém, com coeficientes menores e em torno de 0,2.

Tabela 9. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para as camadas 0 a 10 e 10 a 20 cm.

	Altitude	Argila	Silte	Areia	pH (H2O)	pH (CaCl)	H+Al	Ca	Mg	K	P	N	C	Cu	Fe	Mn	Zn	Dens	Prod
Camada 0 a 10cm																			
Altitude	1																		
Argila	-0,538	1																	
Silte	-0,262	0,377	1																
AreiaTotal	0,540	-0,984	-0,538	1															
pH (H2O)	0,229	-0,312	-0,181	0,320	1														
pH (CaCl)	0,119	-0,136	-0,058	0,135	0,668	1													
H+Al	-0,401	0,366	0,192	-0,371	-0,712	-0,841	1												
Ca	0,011	0,044	-0,013	-0,037	0,543	0,774	-0,667	1											
Mg	0,001	0,069	0,006	-0,064	0,454	0,719	-0,585	0,914	1										
K	0,453	-0,268	-0,110	0,266	0,151	0,121	-0,226	0,217	0,011	1									
P	0,661	-0,322	-0,201	0,333	0,245	0,145	-0,319	0,088	0,007	0,426	1								
N	0,293	-0,046	-0,099	0,062	0,058	0,099	-0,094	-0,017	-0,056	0,158	0,308	1							
C	0,388	0,059	0,087	-0,071	0,165	0,100	-0,129	0,163	0,066	0,305	0,436	0,274	1						
Cu	-0,734	0,735	0,453	-0,757	-0,311	-0,252	0,522	-0,089	-0,113	-0,211	-0,478	-0,139	-0,141	1					
Fe	-0,474	0,203	0,136	-0,211	-0,318	-0,455	0,603	-0,256	-0,336	0,001	-0,327	-0,168	-0,234	0,589	1				
Mn	-0,524	0,306	0,246	-0,326	-0,042	0,004	0,210	0,107	-0,008	-0,118	-0,260	-0,076	-0,064	0,525	0,478	1			
Zn	-0,306	0,277	0,315	-0,313	-0,019	0,108	0,008	0,149	0,087	0,001	-0,154	-0,131	0,169	0,442	0,211	0,292	1		
Densidade	0,303	-0,418	-0,268	0,433	0,023	0,016	-0,127	-0,082	-0,080	0,128	0,299	0,041	-0,055	-0,382	-0,164	-0,252	-0,390	1	
Produtividade	-0,478	0,475	0,173	-0,466	-0,034	-0,091	0,256	0,024	0,006	-0,212	-0,199	-0,172	0,035	0,474	0,209	0,183	-0,008	-0,138	1
Camada 10 a 20cm																			
Altitude	1																		
Argila	-0,533	1																	
Silte	-0,183	0,209	1																
AreiaTotal	0,537	-0,981	-0,394	1															
pH (H2O)	0,297	-0,458	-0,221	0,474	1														
pH (CaCl)	0,152	-0,255	-0,097	0,259	0,779	1													
H+Al	-0,385	0,501	0,194	-0,509	-0,764	-0,854	1												
Ca	0,020	-0,120	-0,022	0,117	0,632	0,809	-0,607	1											
Mg	0,010	-0,072	-0,001	0,068	0,587	0,778	-0,573	0,936	1										
K	0,366	-0,256	-0,127	0,266	0,171	0,146	-0,193	0,228	-0,001	1									
P	0,606	-0,382	-0,082	0,375	0,374	0,203	-0,308	0,068	-0,004	0,341	1								
N	0,076	0,002	0,059	-0,014	0,032	0,062	-0,077	0,072	0,116	0,015	0,070	1							
C	0,257	0,025	0,110	-0,045	0,111	0,061	-0,046	0,120	0,087	0,118	0,295	0,111	1						
Cu	-0,690	0,723	0,276	-0,734	-0,458	-0,348	0,566	-0,161	-0,177	-0,107	-0,440	-0,012	-0,036	1					
Fe	-0,448	0,239	0,083	-0,241	-0,354	-0,414	0,563	-0,215	-0,287	0,106	-0,198	-0,059	-0,064	0,588	1				
Mn	-0,330	0,263	0,100	-0,267	0,049	0,097	0,056	0,266	0,124	0,216	-0,148	0,086	0,142	0,383	0,367	1			
Zn	-0,057	-0,018	0,098	-0,002	0,140	0,188	-0,104	0,369	0,185	0,650	0,030	0,022	0,183	0,229	0,383	0,443	1		
Densidade	0,049	-0,379	-0,147	0,385	0,012	-0,020	-0,083	-0,046	-0,020	-0,111	-0,016	0,177	-0,134	-0,172	0,064	-0,059	-0,169	1	
Produtividade	-0,478	0,444	0,266	-0,470	-0,240	-0,221	0,366	-0,001	0,022	-0,163	-0,247	-0,042	0,090	0,544	0,251	0,239	0,071	-0,169	1

Tabela 10. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para as camadas 20 a 30 cm.

	<i>Altitude</i>	<i>Argila</i>	<i>Silte</i>	<i>Areia</i>	<i>pH (H2O)</i>	<i>pH (CaCl)</i>	<i>H+Al</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Dens</i>	<i>Prod</i>
	<i>Camada 20 a 30cm</i>																		
Altitude	1																		
Argila	-0,523	1																	
Silte	-0,213	0,236	1																
AreiaTotal	0,531	-0,983	-0,411	1															
pH (H2O)	0,174	-0,213	-0,085	0,216	1														
pH (CaCl)	-0,002	-0,033	-0,048	0,041	0,752	1													
H+Al	-0,378	0,382	0,236	-0,403	-0,745	-0,750	1												
Ca	-0,133	0,106	0,066	-0,112	0,629	0,797	-0,511	1											
Mg	-0,170	0,133	0,062	-0,136	0,564	0,716	-0,462	0,837	1										
K	0,345	-0,224	-0,080	0,226	0,192	0,086	-0,157	0,075	-0,075	1									
P	0,459	-0,243	-0,033	0,234	0,261	0,029	-0,199	-0,026	-0,122	0,405	1								
N	0,168	0,028	0,108	-0,047	0,123	0,142	-0,109	0,163	0,114	0,034	0,040	1							
C	0,282	0,127	0,178	-0,153	0,227	0,133	-0,102	0,209	0,097	0,265	0,321	0,103	1						
Cu	-0,655	0,681	0,211	-0,679	-0,210	-0,112	0,427	0,036	0,068	-0,193	-0,215	-0,101	0,022	1					
Fe	-0,368	0,003	-0,030	0,003	-0,232	-0,264	0,490	-0,134	-0,163	0,100	0,009	-0,084	-0,152	0,361	1				
Mn	-0,337	0,170	0,119	-0,182	0,133	0,229	0,023	0,425	0,387	-0,113	-0,121	0,049	0,086	0,213	0,162	1			
Zn	-0,235	-0,007	0,167	-0,025	0,159	0,120	0,149	0,356	0,283	0,090	0,012	0,075	0,069	0,179	0,580	0,489	1		
Densidade	0,237	-0,573	-0,183	0,572	0,111	0,001	-0,199	-0,121	-0,110	0,047	0,162	0,067	-0,068	-0,327	0,104	-0,055	0,029	1	
Produtividade	-0,478	0,514	0,168	-0,514	-0,141	-0,007	0,236	0,105	0,085	-0,147	-0,149	-0,035	0,072	0,519	0,111	0,249	0,056	-0,305	1

5.6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que a metodologia desenvolvida para se obter o mapa de produtividade da cultura de cana-de-açúcar não foi adequada, uma vez que não foi considerado o número de linhas de cana colhida para o preenchimento de um transbordo. A falta dessa variável dificultou a confecção de um mapa que representasse com maiores detalhes os diferentes rendimentos da cultura na área avaliada. Além desse fato, a metodologia exige um longo tempo de implantação e uma grande dependência de mão-de-obra.

O emprego de um monitor de produtividade de cana-de-açúcar pode ser uma alternativa para sanar as dificuldades relativas à metodologia empregada nesta pesquisa.

Para a área de estudo nas profundidades analisadas não foi observada uma boa correlação entre as variáveis de atributo do solo, com produtividade de cana-de-açúcar.

6. DESENVOLVIMENTO DE UM MONITOR DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR

6.1 RESUMO

Para a contribuição da implementação da Agricultura de Precisão na cultura da cana-de-açúcar, a presente pesquisa tem por objetivo desenvolver um monitor de produtividade para essa cultura. O sistema desenvolvido utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um Sistema de Posicionamento Global (“Global Positioning System” – GPS) instalado na colhedora, permitem com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica - SIG a elaboração de mapa digital que representará a superfície de produção para a área colhida. Este sistema foi testado em laboratório e em campo. O teste estático do sistema de pesagem indicou uma linearidade da balança e os testes de campo indicaram uma aceitável acurácia do sistema com um erro médio de 0,96% e um erro máximo de 6,4%.

6.2 SUMMARY

Aiming to contribute to the implementation of Precision Agriculture in sugarcane crop, the objective of this project is to design a sugarcane yield monitor. The system designed uses load cells as a billets weighing instrument set up in the harvester side conveyor before the sugarcane billets are dropped in an in-field trailer. These data together with the geo-referenced position provided by the Global Positioning System (GPS) set up in the harvester, will allow the elaboration of a digital map, which will represent the yield area. This system was tested under laboratory and field conditions. The weighing system static test shows the scale linearity and the field tests show a good accuracy of the system with an average error of 0.96% and a maximum error of 6.4%

6.3 INTRODUÇÃO

Uma importante etapa no processo de levantamento de informações para a aplicação da Agricultura de Precisão (AP) é a obtenção dos mapas de produtividade da cultura (MOLIN, 2001). Esta tecnologia já está sendo aplicada com sucesso em culturas como milho, soja, trigo entre outras, em várias regiões do mundo, principalmente em países desenvolvidos (HAN et al., 1994). Todavia, para Morgan & Ess (2003) as demais culturas que tradicionalmente não são cultivadas nestes países, os recursos técnicos para se aplicar a AP ainda não foram totalmente desenvolvidos, como é o caso da cana-de-açúcar, que tem uma grande expressão econômica para o Brasil, com aproximadamente 5,4 milhões de hectares plantados. Esta cultura movimentava cerca de 12,7 bilhões de reais por ano, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a 2,3% do PIB brasileiro.

Para a implantação da AP com êxito nestas culturas com características próprias e bem distintas de grãos, é necessário o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de produção específico.

Pagnano & Magalhães (2001) desenvolveram um sistema automático de medição da produtividade de cana-de-açúcar quando colhida por máquinas autopropelidas. O sistema utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida. Este sistema foi testado em laboratório e em campo. O erro observado nos ensaios de laboratório, onde simulou-se uma massa constante, oscilou entre um mínimo de 0,70% e um máximo de 2,71 %. Nos ensaios de campo feitos durante a safra de 2000 na Usina Santa Adélia, o sistema automático de medição (SAM) proposto apresentou, um erro que variou de 0,38 % a 28,66%. O erro foi obtido comparando-se o peso calculado pelo SAM com os medidos por uma carreta instrumentada pertencente à COPERSUCAR.

Benjamin (2002) desenvolveu e testou um monitor de rendimento de cana-de-açúcar durante as safras 1999 e 2000. O sistema foi montado em uma colhedora CAMECO CH 2500, ano 1997. O sistema consiste em uma balança, um sistema de aquisição de dados e um DGPS. A balança consistia em um prato de pesagem apoiado por células de carga. A célula de carga foi montada em uma caixa protetora fixada no elevador da colhedora. A balança montada no chão do elevador registrava medidas instantâneas de produtividade de cana-de-açúcar. Um vagão equipado com um sistema de pesagem foi usado para cada teste como padrão. Foram feitos testes com diferentes níveis de maturidade de cana, variedade, duração de seção e taxa

de fluxo. Para cada teste, se comparou as leituras obtidas pela balança, com as medidas pelo vagão. A média de erro da balança foi de 11,05%. Os resultados também mostraram que as diferentes variedades de cana tiveram um efeito nas leituras de balança, mas a maturidade da cana, duração de seção e a taxa de fluxo não tiveram efeito significativo.

Todos os trabalhos citados obtiveram erros médios maiores que 10%. Esta pesquisa tem como objetivo instrumentar uma colhedora de cana-de-açúcar, de modo a permitir a obtenção do mapa de produtividade dessa cultura com erros inferiores aos encontrados na literatura.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Funcionamento e descrição do monitor de produtividade de cana-de-açúcar

O sistema desenvolvido utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem, com o auxílio de um SIG, a elaboração de um mapa digital que representa a superfície de produção para a área colhida. Além destes equipamentos, foram instalados na máquina, sensores para indicar a rotação da esteira, velocidade de deslocamento da colhedora e ângulo do elevador. Informações necessárias para que um programa dedicado, instalado em um computador de bordo localizado na cabine da colhedora, gerencie as informações e gere ao final, um banco de dados que represente a superfície de produtividade colhida. Este equipamento chamado de “sistema de mapeamento de produtividade de cana-de-açúcar” (SIMPROCANA) foi instalado na colhedora como mostra a Figura 41.

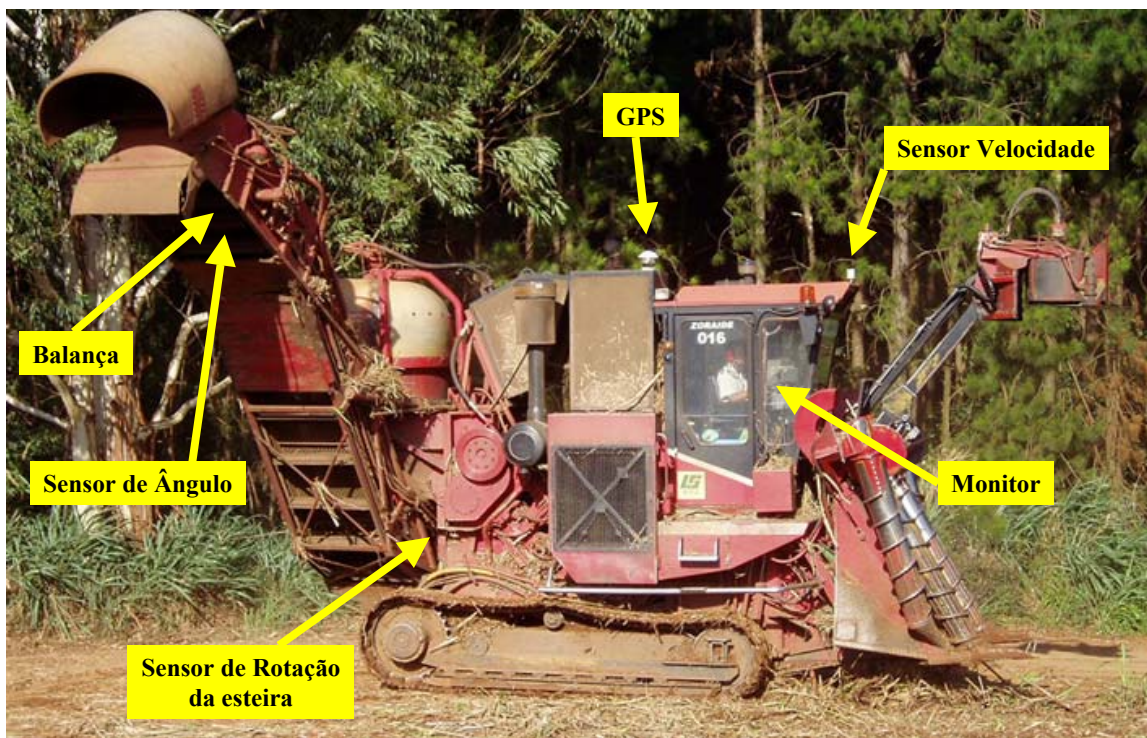


Figura 41. Colhedora adaptada com o sistema de mapeamento de produtividade.

A seguir estão descritas as principais partes utilizadas para o desenvolvimento do SIMPROCANA.

Sistema de pesagem

O principal componente do sistema consiste em uma balança de 420 x 800 x 3mm projetada e construída para ser adaptada à colhedora. A balança utiliza duas células de carga extensométricas GL-30 da ALFA INSTRUMENTS, cujas características construtivas fornecidas pelo fabricante são:

Capacidade Nominal: 30 kg

Sensibilidade: 2 mV/V +/- 10%

Erro combinado: <0,03% da saída nominal

Máxima sobrecarga sem alterações: 150% da capacidade nominal

Sobrecarga de ruptura: 300% da capacidade nominal

Temperatura de trabalho útil: -5 a +60 °C

Excitação máxima: 15Vcc

A seleção desse modelo de célula de carga baseou-se na produtividade máxima esperada de um canavial e na velocidade de deslocamento da esteira e da colhedora, obtendo-se assim uma estimativa da quantidade máxima e mínima de cana que estaria sendo pesada em um determinado período. As células deveriam ainda suportar o peso da placa de pesagem e as possíveis sobrecargas ocorridas em campo. Estas sobrecargas podem acontecer devido ao acúmulo de material colhido em manobras ao final das linhas do talhão, devido às forças inerciais da massa de rebolos a ser pesada quando a colhedora está em movimento, ou ainda por ocasiões, quando fragmentos de cana passam presos entre a talisca e o fundo do elevador forçando a balança.

As células de carga foram instaladas na balança em paralelo, de tal forma que a carga aplicada em qualquer ponto desta apresenta o mesmo valor (Figura 42).

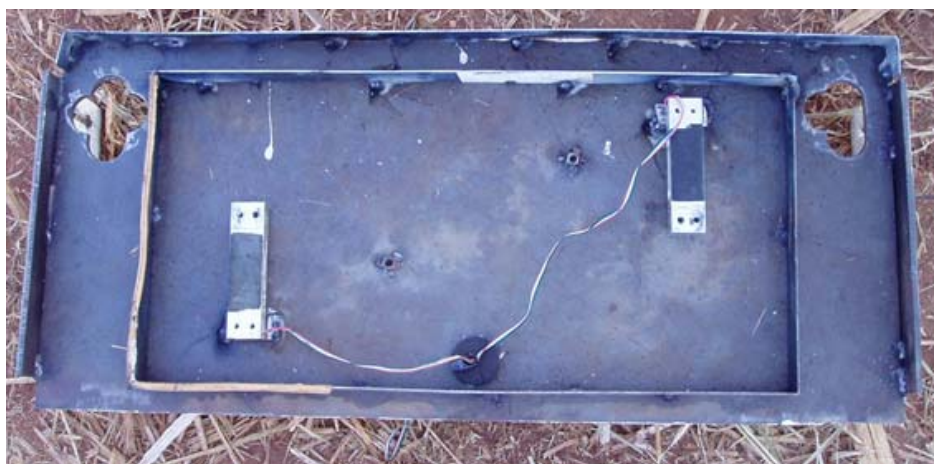


Figura 42. Vista superior da balança sem a placa de pesagem montada, mostrando a disposição das células.

A balança foi instalada no final da esteira transportadora, em sua seção de menor inclinação (Figura 41 e 43) e onde a maior parte das impurezas (mineral e vegetal), já foram eliminadas pelos rolos de corte e alimentação, pelo extrator primário e pela própria esteira do elevador.

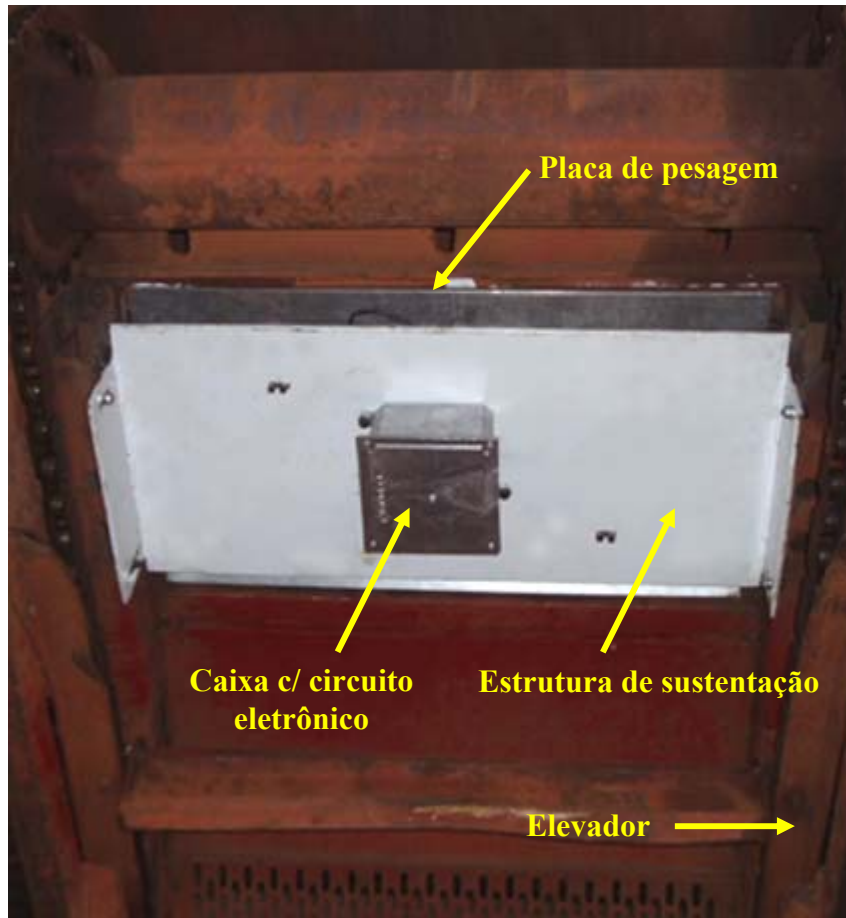


Figura 43. Dispositivo para determinação da pesagem da cana-de-açúcar colhida instalada no elevador da colhedora e localização da caixa de alumínio contendo o circuito eletrônico montado na parte de baixo do sistema de pesagem.

Sensor de rotação da esteira

A rotação da esteira do elevador da colhedora é uma informação importante para calcular a sua velocidade e, conseqüentemente, o fluxo de cana-de-açúcar que passa sobre o sistema de pesagem.

O sensor de rotação consiste em uma engrenagem de 17 dentes e um sensor magnético fixado em uma estrutura utilizada para proteger a engrenagem (Figura 44). A engrenagem foi instalada no eixo do motor hidráulico que aciona a esteira do elevador. A cada volta completa da engrenagem, 17 pulsos são gerados pelo sensor magnético. Uma vez que a rotação média

da esteira é de 150 rpm, 42 pulsos são gerados por segundo (42 Hz) o suficiente para aquisição de dados e indicação da rotação do elevador.

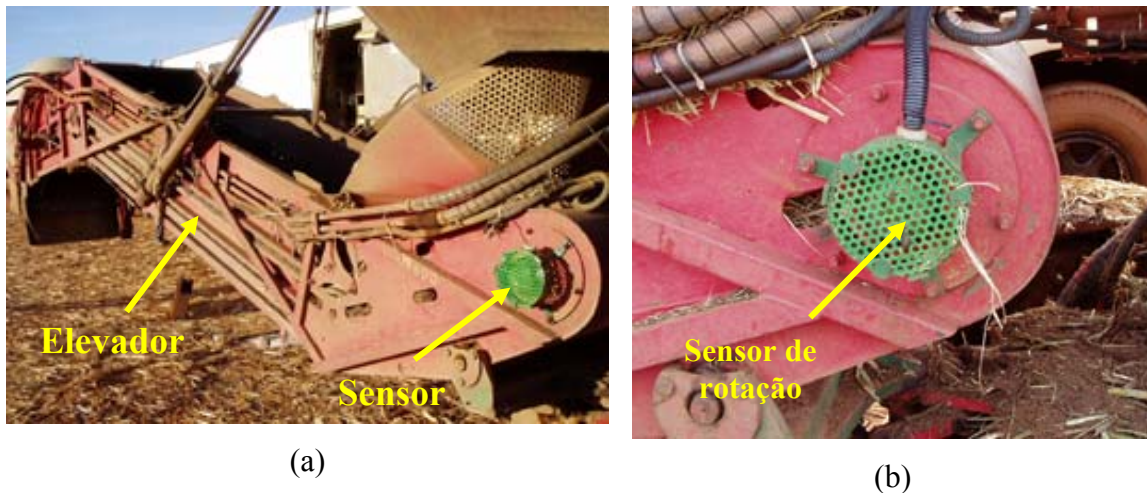


Figura 44. Localização do sensor magnético utilizado para medir a rotação do elevador da colhedora. a) vista geral do elevador e localização do sensor, b) vista detalhada do sensor.

Para a leitura desse sensor elaborou-se um circuito para converter o sinal de frequência (Hz) emitido por ele para o sinal em tensão (V). Posteriormente, através da placa de aquisição de dados do monitor, o sinal pôde ser interpretado. O circuito integrado utilizado foi o LM2907 da marca National. A Figura 45 mostra o esquema do circuito elétrico do conversor frequência/tensão.

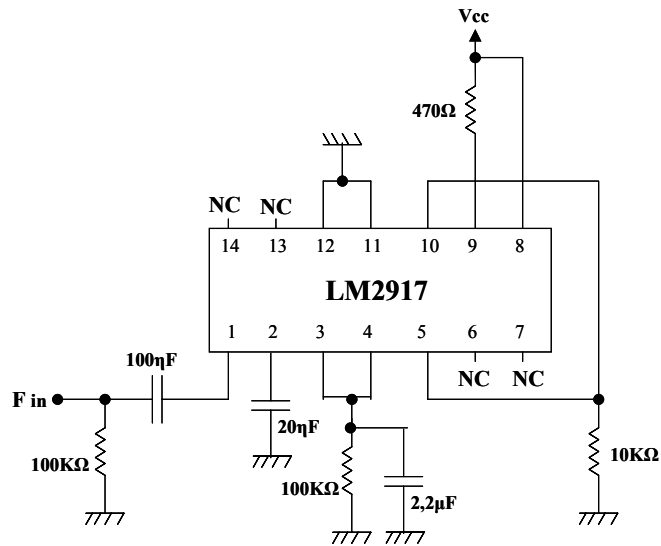


Figura 45. Esquema do circuito elétrico do conversor freqüência/tensão.

Sensor de velocidade da colhedora

Para se determinar o espaço percorrido pela colhedora e conseqüentemente a área colhida em um intervalo de tempo definido, foi necessária a utilização de um sensor de velocidade de deslocamento da colhedora. Foi utilizado o SV18GPS, da marca Auteq (Figura 46). Esse sensor utiliza a tecnologia GPS para disponibilizar em uma saída pulsada, a velocidade da máquina. As características do sensor fornecidas pelo fabricante são:

Constante do sinal: 100.000 pulsos km^{-1}

Tensão de alimentação: de 6 a 36 V

Corrente de consumo: 25 mA em 12 V

Sinal de saída: onda quadrada, com amplitude de 0 a 12



Figura 46. Sensor de velocidade SV18GPS.

Para a leitura do sinal proveniente do sensor de velocidade da colhedora foi construído um segundo conversor frequência/tensão com as mesmas características do conversor utilizado para o sensor de rotação da esteira.

Esse sensor apresentou como característica um atraso de aproximadamente 4 segundos na indicação da velocidade. O atraso no registro da velocidade foi observado no início e no término da movimentação da colhedora.

Sensor de indicação de colhedora parada

Devido à característica de atraso apresentada pelo SV18GPS e a necessidade de se conhecer quando a máquina está parada ou em movimento para se reduzir os erros provenientes de paradas indesejadas, troca de transbordo e de manobra de cabeceira, fez-se necessária a instalação de um sensor que atendesse a essa finalidade.

Um sensor magnético foi instalado no cabo de avanço do motor hidráulico responsável pelo movimento e parada da colhedora, o qual é acionado pelo manche da cabine da colhedora. Quando a máquina está parada o sensor fecha seu circuito e envia ao programa um sinal de ligado e quando a colhedora está em movimento, o contato do sensor é aberto e envia uma informação de desligado. Essa informação é importante para a lógica e bom funcionamento do sistema.

Sensor de ângulo do elevador

Um sensor de ângulo baseado em um acelerômetro modelo ADXL103 da Analog Devices foi desenvolvido para se determinar o ângulo de inclinação do elevador. A característica principal do ADXL103 é a capacidade de medir aceleração dinâmica (vibração) e aceleração estática (gravidade). Uma vez que o acelerômetro é capaz de medir gravidade, ele utiliza essa força como vetor de entrada para determinar a orientação de um objeto no espaço. Quando o acelerômetro está posicionado perpendicularmente à força da gravidade o seu sinal de saída muda 17,5mg para cada grau de declividade. A partir dessas informações foi desenvolvido um condicionador de sinal do acelerômetro e assim desenvolvido o sensor de ângulo.

Esse sensor foi montado paralelamente ao sensor de peso, de forma a indicar o mesmo ângulo em que a balança se encontra. Esse ângulo é importante para corrigir o peso, uma vez que é medido em um plano inclinado. Para se obter o peso real (força normal) utilizou-se a Equação 2.

$$PR = PM \times \cos(AE) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: PR = peso real; PM = peso medido e AE = ângulo do elevador

Receptor GPS

Para indicação do posicionamento da colhedora no campo foi utilizado o receptor GPS Omnistar 7000L. Embora esse receptor esteja apto a receber sinal de correção diferencial via satélite, não estava ainda habilitado no momento da pesquisa para receber tal correção. Todos os dados de produtividade foram coletados sem a correção diferencial.

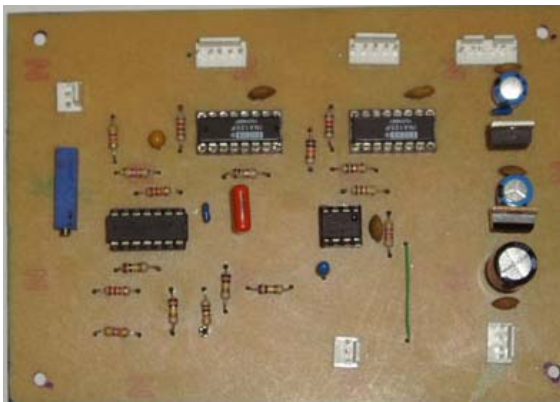
Molin & Gimenez (2002) afirmam que mapas de produtividade obtidos com receptores GPS, com correção diferencial via satélite possuem uma correlação de mais de 78% com mapas obtidos com receptores GPS sem correção diferencial e que portanto, este último pode ser utilizado para o mapeamento de produtividade como forma de reduzir custos. Esta informação serviu de base para coleta dos dados de produtividade sem o uso de sinais de correção diferencial.

A antena do GPS foi instalada no centro e sobre a cabina da colhedora.

Condicionador de sinal das células de carga

O condicionador de sinal das células de carga utilizado foi um circuito integrado INA 125 da marca Burr-Brown. Para cada célula foi construído um condicionador, o qual tinha como objetivo amplificar o sinal proveniente da célula para uma tensão de 0 a 5V. O sinal de cada condicionador era somado por meio de um circuito eletrônico somador e que, posteriormente, passava por um filtro passa baixa de ordem 2, tipo Butterworth, com uma frequência de corte de 9Hz. Esse filtro foi construído para minimizar os ruídos advindos da eletricidade e da vibração mecânica. Em relação aos ruídos oriundos da vibração mecânica Pagnano (2001) realizou um estudo da frequência de vibração da esteira transportadora de uma colhedora de cana-de-açúcar com sistema de rodagem de esteiras metálicas trabalhando no campo. Constatou que os principais modos de vibração da esteira transportadora ocorrem nas frequências de 40, 60, 80 180 e 200 Hz. A partir dessa informação, a frequência de 9Hz para o filtro foi adotada por ser maior do que a frequência de passagem das massas a serem pesadas, 3,78 Hz, e menor que a frequência da vibração mecânica e dos ruídos elétricos.

Todos esses circuitos estão acondicionados em uma caixa de alumínio fundido (Figura 47) e localizado abaixo do sensor de peso no extremo final do elevador (Figura 43).



(a)



(b)

Figura 47. a) Circuito eletrônico b) Caixa de alumínio que acondiciona o circuito eletrônico.

Sistema de aquisição de dados

Para que o sistema desenvolvido possa se tornar comercial e não sensível à vibração e poeira, foi utilizado como “data logger” um sistema embutido PPC- A120T da empresa Advantech. Este equipamento instalado na cabina da colhedora possui um processador NS Geode GX1 300 Mhz, 128 Mb SDRAM, monitor de 12” sensível ao toque e uma interface PCI-1710HGL-A de 12 bits para aquisição de dados. Neste sistema de aquisição de dados é executado o programa de gerenciamento de todo o sistema.

O monitor de colheita, a placa de aquisição de dados, acondicionada em uma caixa metálica, e a interface conversor Frequência/Tensão para leitura dos sinais provenientes do SV18GPS para indicação da velocidade da colhedora e do sensor magnético para indicação da rotação do elevador, podem ser vistos na Figura 48. Todos esses equipamentos estão montado em um estrutura de aço acoplada à coluna da cabina da colhedora.

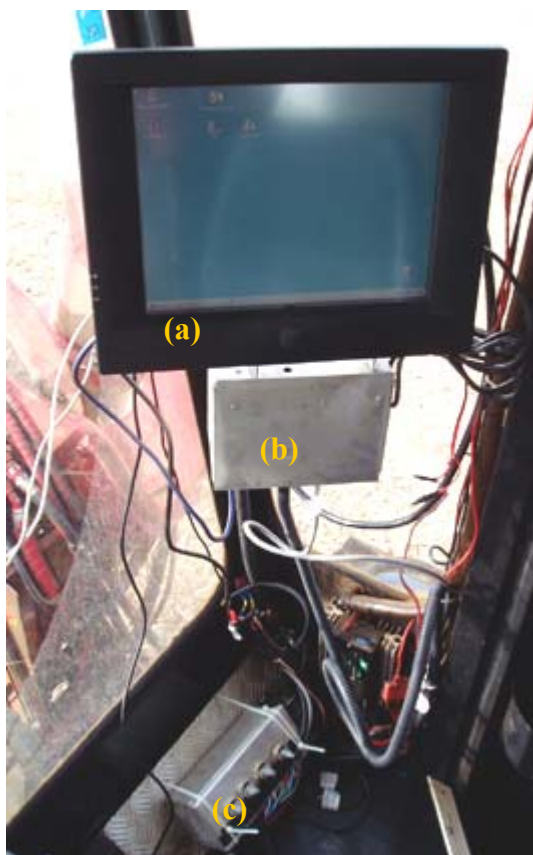


Figura 48. Vista dos equipamentos montados na cabina da colhedora: (a) monitor de colheita, (b) placa de aquisição de dados e (c) a interface conversor Frequência/Tensão.

Programa de gerenciamento:

O software Borland C++ Builder 3 que utiliza a linguagem de programação C foi utilizado para confeccionar um programa computacional para gerenciar o sistema de aquisição de dados do SIMPROCANA. O programa é responsável pela leitura e interpretação de todos os sensores e pela criação de um banco de dados que represente a superfície de produtividade da área colhida.

A seguir estão descritas as principais etapas do programa e as opções que o usuário pode escolher para a configuração e início do programa.

A tela inicial do programa mostra ao usuário as opções existentes na tecla “menu” quando o usuário o ativa. Estas opções são: criar um novo arquivo; abrir um arquivo já existente; configurações do programa e; desligar o computador.

Quando o usuário cria um novo arquivo, uma pequena tela se abre ao lado das opções do menu para que ele digite por meio de um teclado virtual o nome do arquivo que deseja criar. O nome desse arquivo é composto do número referente à zona da usina, mais o número do talhão e o ano atual. O arquivo possui extensão TXT.

Na opção “abrir”, o usuário pode recuperar um arquivo já existente para continuar a aquisição de dados. Esta opção deve ser usada quando, por algum motivo, a colheita em um talhão foi interrompida e após algum tempo, inicia-se do local parado.

As opções de configuração incluem: a) taxa de aquisição, é a frequência com que o sistema irá registrar as informações no arquivo que pode ser de 2, 5 ou 10 segundos; b) espaçamento entre linhas de cana (m); c) interface serial, nesta opção podem-se selecionar a porta de comunicação e a taxa de transmissão da serial; d) “flags”, são opções que o usuário pode selecionar para identificar a ocorrência de algum problema na área no momento da colheita. Opções de “flags” implantadas são: planta daninhas, falhas e praga.

Após a escolha de uma das opções oferecidas no menu inicial o programa apresentará a tela final. Nesta tela constam todas as informações como: latitude, longitude, peso instantâneo, peso acumulado e produtividade, assim como, botões que permitem iniciar ou parar o programa e dois botões referentes aos “flags” definidos pelo usuário na opção de configuração. Ainda nesta tela o operador da colhedora pode observar o mapa de produtividade que está sendo gerado. Este mapa é formado por áreas de 5 diferentes cores, as quais representam as faixas de produtividade. A Figura 49 mostra a tela final do programa.



Figura 49. Imagem da tela final do programa de gerenciamento do SIMPROCANA.

A seguir está descrito o funcionamento do programa de gerenciamento do monitor de produtividade de cana-de-açúcar.

Ao iniciar a aplicação, o primeiro passo do programa é realizar, através da serial RS-232 do microcomputador, uma leitura dos dados provenientes do GPS, para localização da posição da colhedora.

O segundo passo é selecionar estes dados retirando apenas as coordenadas geográficas (latitude e longitude). O terceiro passo é transformar essas coordenadas geográficas em coordenadas UTM e armazenar esses valores em suas respectivas variáveis. A leitura do GPS é feita a cada um segundo.

No quarto passo, dentro desse período de um segundo, o programa possibilita a leitura, a uma taxa de aquisição de 40Hz, de todos os sensores: (sensor de velocidade da colhedora; sensor de ângulo do elevador; sensor de rotação do elevador e o sensor de pesagem de rebolos de cana-de-açúcar). As quarenta aquisições, para cada sensor, são ordenadas de forma crescente e depois retira-se os dez maiores e os dez menores valores. Uma média dos vinte valores restantes é realizada e armazenada em cada respectiva variável.

O último passo é responsável pela lógica do programa, o qual possibilita a leitura dos sensores de “status” da colhedora. Tais sensores indicam se o corte de base da colhedora está ligado ou não, se a esteira do elevador está ativa ou não e os sensores de posição do elevador indicam se a máquina está em manobra ou não. Com base nesses sensores de “status” o programa identifica se a colhedora está parada, em movimento ou em manobra, ou ainda se está esperando transbordo (E.T), se está no fim do talhão (F.T) ou no início do talhão (I.T). Na Tabela 11 estão as possíveis combinações de “status” da colhedora que podem ocorrer, onde 1 significa que o sensor está ligado e 0 desligado :

Tabela 11. Possíveis combinações de “status” da colhedora que podem ocorrer no campo.

Sensor	"Status" da colhedora					
	Colhendo	Parada	Manobra	E.T.	I.T.	F.T.
Corte de base	1	0	1	1	1	1
Esteira	1	0	0	0	0	1
Posição do elevador	0	0	1	0	0 ou 1	0
Velocidade colhedora	1	0	0 ou 1	0	0	0

Quando a colhedora estiver na condição **parada** o programa se reinicia com o primeiro passo. Se a colhedora estiver na condição **colhendo** o programa armazena as coordenadas obtidas pelo GPS como sendo a posição inicial e incrementa um contador. O contador é igual ao intervalo de aquisição de dados configurado pelo usuário que pode ser 2, 5 ou 10 segundos. Se o contador for igual à taxa de aquisição o programa armazena as coordenadas obtidas pelo GPS como sendo a posição final e calcula o ponto central entre a coordenada inicial e final. O programa atribui a esse ponto os valores de peso acumulado no intervalo da taxa de aquisição, a velocidade média da colhedora nesse intervalo de tempo, a área colhida, a produtividade dessa área e outras informações como horário do registro, velocidade da esteira e ângulo do elevador. Se o contador ainda não for igual à taxa de aquisição o programa volta para o primeiro passo.

O cálculo do fluxo de rebolos de cana-de-açúcar a cada um segundo é obtido pela Equação 3.

$$Fl_c = Pm \times \frac{Ve}{CB} \times \cos(AE) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: Fl_c = Fluxo de cana a cada 1 segundo; Pm = média das leituras de peso em 1s; Ve = velocidade média da esteira; CB = comprimento da balança e AE = ângulo do elevador

O cálculo do peso acumulado no intervalo da taxa de aquisição é obtido pelo somatório dos pesos a cada um segundo.

O cálculo da área colhida (célula) nesse período é obtido multiplicando-se o espaço percorrido (colhedora) pelo espaçamento entre linhas da cultura da cana-de-açúcar.

A produtividade dessas células é a razão entre peso acumulado e área colhida.

Se a colhedora estiver na condição **esperando transbordo** significa que ela pode estar parada ou colhendo até preencher o bojo do elevador. Se a segunda opção ocorrer o programa armazena as coordenadas obtidas pelo GPS como sendo a posição inicial e incrementa um contador. Se o contador for igual à taxa de aquisição, mas o sensor de “status” da esteira ainda permanecer desligado o programa zera o contador e inicia novamente a contagem até que o sensor de esteira seja ligado. Quando ligado, o programa armazena as coordenadas obtidas pelo GPS como sendo a posição final e adota o mesmo procedimento para condição de colhedora em movimento. A diferença é que a área colhida pode ser maior que a calculada normalmente.

6.4.2 Testes de laboratório

Os testes de laboratório consistiram em determinar as curvas de calibração das células de carga, do sensor de ângulo e em testar o sistema montado no elevador de uma colhedora. Este elevador é de uma colhedora BRASTOFT A-7700 e está montado, de forma estacionária, no Laboratório de Instrumentação e Controle da FEAGRI/UNICAMP, utilizando-se, para acioná-la, uma unidade hidrostática de velocidade variável (Figura 50).

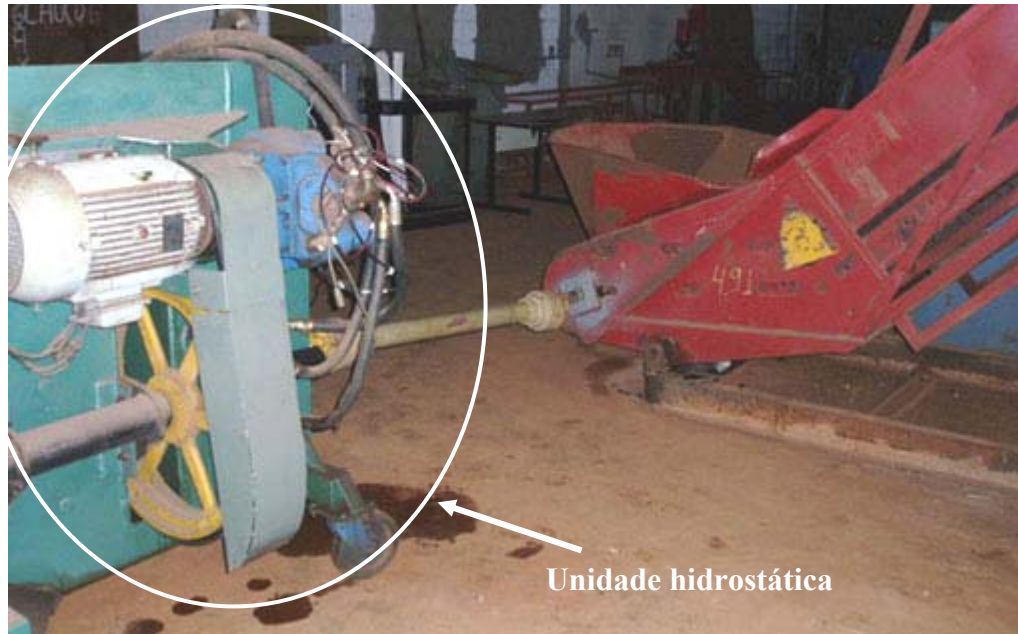


Figura 50. Unidade hidrostática utilizada para o acionamento do elevador da colhedora em laboratório.

Os testes de laboratório foram realizados para se obter a maior quantidade possível de informações sobre o sistema, de modo a poder instalá-lo em campo na safra de 2004, apenas para o levantamento final dos dados.

6.4.2.1 Calibração do sensor de velocidade da colhedora

Nesta etapa, desenvolveu-se um programa em linguagem C++, com a finalidade de interpretar o sinal proveniente do SV18GPS e mostrar no monitor o seu respectivo valor em forma de tensão. O procedimento utilizado para a calibração consistiu em cronometrar o tempo de deslocamento da colhedora em 4 diferentes rotações do motor, num percurso de 60 metros delimitados por dois cones (Figura 51). Durante o percurso, o programa fazia 1000 aquisições de tensão indicadas pelo sensor de velocidade e calculava uma média desses valores. Foram feitas três repetições desse procedimento. Com os dados de velocidade obtidos pela divisão do percurso pelo tempo e com os seus respectivos valores de tensão, pôde-se construir a curva de calibração para o SV18GPS.



Figura 51. Calibração do sensor de velocidade da colhedora em condições de campo.

6.4.2.2 Calibração estática das células de carga

Para se determinar as características estáticas de cada célula de carga um programa dedicado foi desenvolvido em linguagem C com o objetivo de indicar e salvar em um arquivo os sinais (Volts) das células de carga.

Utilizando-se massas padrão fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesos e medidas (INPM) e o programa dedicado, fizeram-se 5 repetições variando-se o peso de 0 a 25 kg. Em cada ponto de calibração eram coletados dados por 10 segundos a uma frequência de 100 Hz, e posteriormente, calculava-se a média desses dados. Este levantamento permitiu determinar a curva de calibração estática para cada célula, além de verificar sua acurácia, histerese, e repetibilidade.

6.4.2.3 Calibração estática do sensor de ângulo

Para se determinar as características estáticas do sensor de ângulo o mesmo programa dedicado foi utilizado com o objetivo de indicar e registrar em um arquivo os sinais (V) gerados pelo inclinômetro.

O mesmo procedimento citado acima para calibração das células de carga foi adotado para a calibração do sensor de ângulo. Assim, com o auxílio de um transferidor, diversos ângulos foram ajustados para se calibrar o sensor de ângulo.

6.4.2.4 Calibração do sensor de peso

Este ensaio teve como objetivo obter a curva de calibração do sensor de peso (balança). Com todo o sistema montado e utilizando o mesmo programa dedicado de aquisição de dados para os outros ensaios, colocou-se massas conhecidas de 0 a 25 kg sobre a balança (sensor de peso) tanto carregando como descarregando, conforme ilustra a Figura 52. Foram feitas cinco repetições desse procedimento. Em cada ponto de calibração eram coletados dados por 10 segundos a uma frequência de 100 Hz, e posteriormente, calculava-se a média desses dados. Com essas informações para cada uma das cinco repetições foi possível determinar a curva de calibração estática da balança, além de verificar sua acurácia.



Figura 52. Ensaio de calibração da balança em condições de laboratório.

6.4.3 Teste de campo

O teste de campo consistiu em avaliar a acurácia do sistema desenvolvido em condições de campo. A avaliação da acurácia dos dados de produtividade obtidos pelo sistema desenvolvido foi realizada comparando-se o peso de cana medido pela balança, com o peso de cana de um caminhão pesado na usina.

A cana-de-açúcar depois de colhida era transferida para um conjunto composto por dois transbordos (dianteiros e traseiros) os quais eram despejados em um “rodotrem” (Figura 53). Para completar a carga de um “rodotrem” é necessário em media quatro conjuntos de transbordos.



Figura 53. Carga dos transbordos sendo transferida para o “rodotrem”.

Os dados provenientes da pesagem de cada caminhão foi considerado como **peso real** e os dados obtidos pelo sistema desenvolvido durante o preenchimento de cada caminhão, foi considerado **peso calculado**. A partir desses dois pesos realizou-se uma análise estatística para avaliar a acurácia do sistema.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Testes de laboratório

A seguir estão descritos os resultados obtidos para todos os ensaios de laboratório.

6.5.1.1 Calibração estática do sensor de ângulo

Os resultados do ensaio de calibração do sensor de ângulo podem ser vistos na Figura 54. A curva de calibração obtida para o sensor de ângulo indica uma linearidade do sensor com um r^2 de 0,998. Esta linearidade permitiu que o acelerômetro pudesse ser utilizado como um sensor de ângulo.

A curva de calibração estática (Equação 4) para o sensor de ângulo foi:

$$Y = 31,698x - 0,2796 \pm 0,00123 \text{ (erro provável)} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo que x representa o sinal dado em Volt e Y o ângulo em graus.

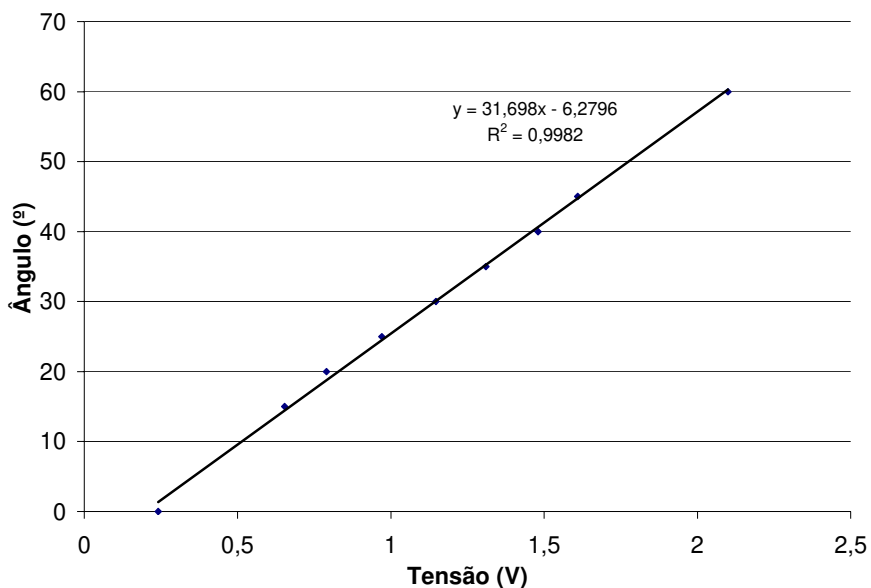


Figura 54. Curva de calibração do sensor de ângulo.

6.5.1.2 Calibração do sensor de velocidade da colhedora

A partir dos dados de velocidade, com seus respectivos valores de tensão obtidos neste ensaio, pôde-se determinar uma curva de calibração para o SV18GPS como mostra a Figura 55.

A equação 5 da curva de calibração gerada foi utilizada no programa de controle do sistema com a finalidade de informar a velocidade de deslocamento da colhedora no campo. Analisando-se a figura pode-se verificar a linearidade do SV18GPS, com um $r^2 = 0,999$.

$$Y = 0,7516 X - 0,0158 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

Y = velocidade (m s^{-1})

X = tensão (V)

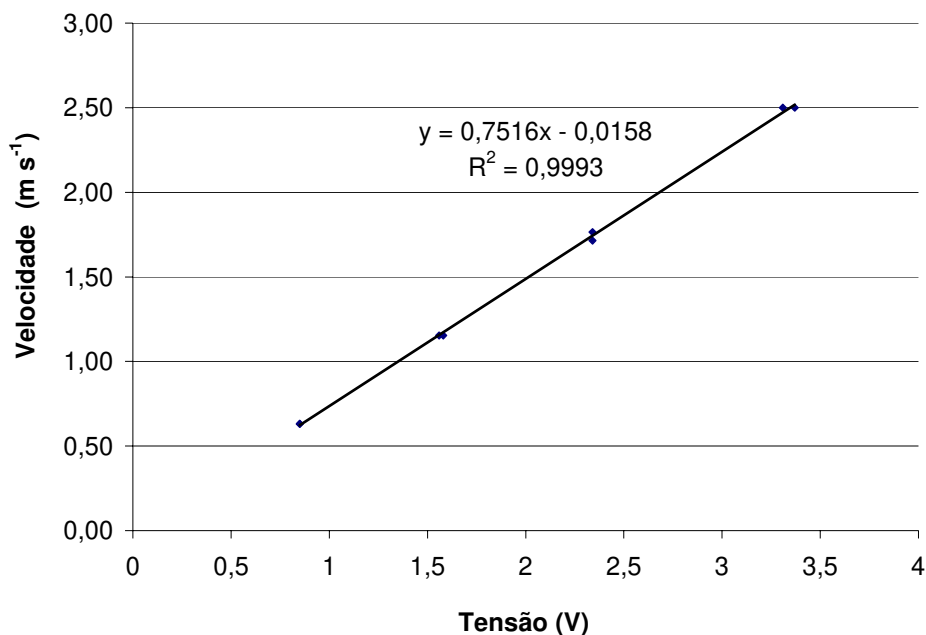


Figura 55. Curva de calibração do sensor de velocidade SV18GPS.

6.5.1.3 Calibração estática das células de carga

Este levantamento permitiu determinar a curva de calibração estática para cada célula, além de verificar sua acurácia (Figura 56).

As curvas de calibração estática foram:

Célula 1:

$$y = 0.000257279x + 0.000559904$$

$$r^2 = 0.999$$

Célula 2:

$$y = 0.000249294x + 0.000532669$$

$$r^2 = 0.999$$

Onde x representa a massa em quilogramas e y o sinal dado em Volt.

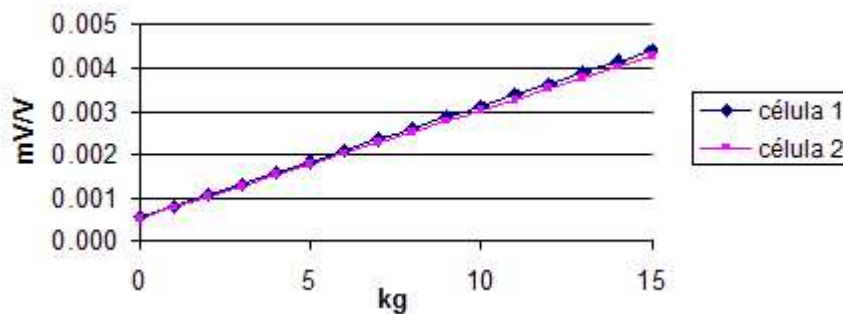


Figura 56. Curvas de calibração das células de carga utilizadas nos ensaios.

As células de carga utilizadas não apresentaram histerese e apresentaram boa repetibilidade e uma linearidade.

6.5.1.4 Calibração do sensor de peso

A Figura 57 mostra a curva de calibração do sensor de peso, obtida no ensaio estático de laboratório.

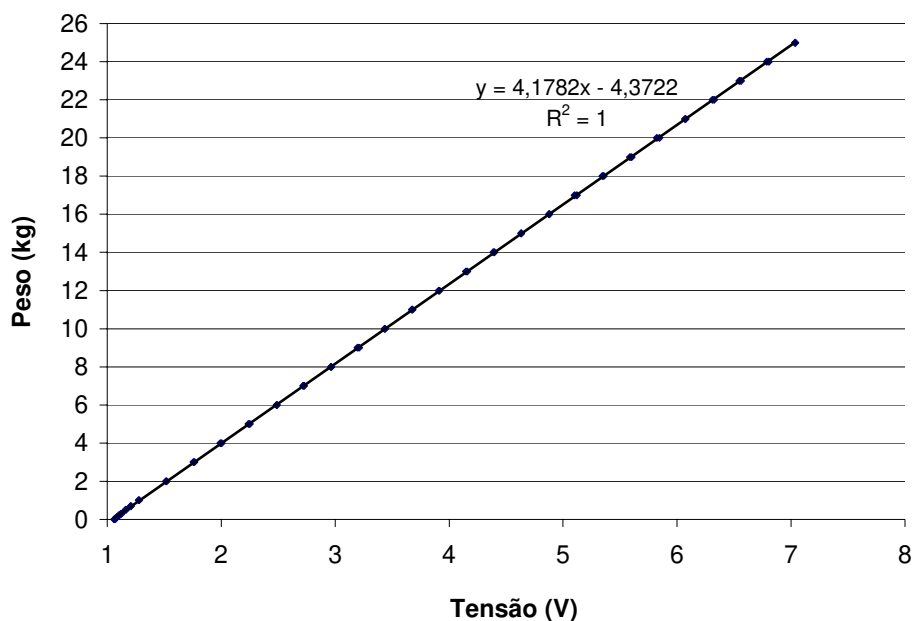


Figura 57. Curva de calibração do sensor de peso obtido em laboratório.

Analisando-se a Figura 57 pode-se verificar a linearidade do sistema de pesagem com um $r^2 = 1$. A curva de calibração estática (Equação 6) para o sistema de pesagem foi:

$$\text{Peso (kg)} = 4,1782 \cdot (\text{sinal volts}) + 4,3722 \pm 0,0214 \text{ (erro provável)} \quad \text{Eq. 6}$$

6.5.2 Teste de campo

A Tabela 12 mostra os dois pesos coletados, **peso considerado real**, proveniente da pesagem de cada caminhão e **peso calculado**, obtido pelo sistema desenvolvido durante o preenchimento de cada transbordo, e o erro entre eles em massa e porcentagem.

Tabela 12. Comparação dos pesos medidos do caminhão com os do sistema desenvolvido

Repetição	Caminhão	Balança	Erro	Erro
	-----	-----kg-----	-----	%
1	58530	58978	-448	-0,8
2	54570	52718	1852	3,5
3	57080	59071	-1991	-3,4
4	58110	60071	-1961	-3,3
5	63340	60251	3089	5,1
6	58660	62120	-3460	-5,6
7	61750	65327	-3577	-5,5
8	63810	61515	2295	3,7
9	58660	55945	2715	4,9
10	58770	55748	3022	5,4
11	58290	54798	3492	6,4

Analisando-se a Tabela 12 é possível observar que o erro médio obtido foi de 0,96 % e que o erro máximo encontrado foi de 6,4%, indicando uma boa acurácia do monitor de produtividade de cana-de-açúcar desenvolvido.

6.6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e as adaptações efetuadas permitem a fácil reprodução deste sistema em qualquer outra colhedora que possua o mesmo tipo de mecanismo de transporte de cana-de-açúcar para o transbordo.

O sistema está funcionando de acordo com o proposto, ou seja, o protótipo desenvolvido é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo, com um erro médio de 0,96% e um erro máximo de 6,4%.

7. CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR: bases para recomendação de uma aplicação variada de fósforo, potássio e calcário

7.1 RESUMO

Este trabalho tem como objetivo mapear a produtividade da cultura cana-de-açúcar em uma área de 42 ha utilizando o monitor de produtividade de cana-de-açúcar desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP, correlacionar a produtividade com os atributos físicos e químicos do solo e recomendar uma aplicação variada de fósforo, potássio e calcário. O monitor permitiu a elaboração de um mapa digital que representa a superfície de produção para uma área de 42 ha colhida. O erro médio dos dados de produtividade de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 9%. Para se determinar as propriedades do solo, amostras foram retiradas no início da safra 2003/2004 utilizando-se uma grade regular de 100 x 100 m. Os resultados analíticos dos atributos físicos do solo para as amostras oriundas da grade foram tratados por meio de técnicas de geoestatística e permitiram verificar sua correlação com a produtividade da cultura. As correlações apresentaram baixos valores, menor que 0,5. Esta informação sugere que outras propriedades além das de solo sejam analisadas como incidência de plantas daninhas, distribuição de água dentro do talhão, incidência de luz solar, drenagem entre outros. Baseando-se nos atributos químicos do solo realizou-se uma comparação entre o método de aplicação de calcário, fósforo e potássio pela média, adotado pela usina, com o método de aplicação variada de insumos, considerando análise de solo em grade adotada. A aplicação de fósforo em taxa variável foi a que apresentou significativa redução de dosagem recomendada comparando com a aplicação feita pela média. Aplicando-se P_2O_5 de forma localizada a redução desse insumo é da ordem de 71,5 %. A recomendação de aplicação de calcário, fósforo e potássio em taxas variáveis apresentaram um ganho de aproximadamente R\$3.000,00 na área total ou R\$72,00 por hectare.

7.2 SUMMARY

This research has as a main objective to map the sugarcane yield and to correlate it with the physical and chemical attributes of soil aiming to finding sources for an application of inputs in a more adequate and economically advantageous way. In order to achieve this objective, a testing area measuring 42 ha located at São João Sugarcane Mill in Araras, a city in São Paulo State, Brazil, was selected. A yield monitor developed by FEAGRI/UNICAMP, which is denominated SIMPROCANA, was used. In order to determine the soil properties, samples were collected in the beginning of 2003/2004 harvest by means of using a regular grid measuring 100 x 100 m. The analytical results of the physical attributes of soil for the samples collected from the grid were treated using geostatistical techniques that permitted verification of their correlation with the crop yield. The correlation presented low values, less than 0.5. A comparison between the average application method of lime, phosphorus and potassium basing on the chemical attributes of soil used by the sugarcane mill, and the varied application method, considering the soil analysis in grid adopted. The application of phosphorus in variable rates presented a significative reduction on the recommended dosage (71.5%), when compared with the application obtained by means of average. The application recommendation of lime, phosphorus and potassium, in variable rates, presented a profit of nearly R\$ 3,000.00 over the total area or R\$ 72.00 per hectare.

7.3 INTRODUÇÃO

Linsley e Bauer citados por Goering (1993) apresentaram em 1929, a Circular no. 346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (USA). Nessa circular os autores concluíram que: os requisitos de aplicação variavam bastante para um mesmo talhão em sua necessidade de calcário; e a necessidade de que fossem feitos testes sistemáticos e detalhados no campo, de forma que o calcário pudesse ser aplicado de acordo com a sua necessidade. Essa idéia permaneceu no esquecimento por muitos anos, até o momento em que a disponibilidade de microcomputadores, sensores e sistemas de posicionamento via satélite se tornaram disponíveis a custos acessíveis.

Surgiu desse modo, a Agricultura de Precisão, a qual segundo Molin (2001) é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção

sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados

Em relação a variabilidade espacial da produção diversos trabalhos tem sido encontrados na literatura referente ao desenvolvimento de sensores de produtividade e utilização desses sensores para o estudo da variabilidade espacial da produtividade da cultura. Borgelt et al. (1992), Johnson (1996), Molin (2001), Pagnano (2001), Morgan e Ess (2003) descrevem inúmeras técnicas para determinação da variabilidade espacial da produtividade de uma cultura, como: sensores de impacto para medida de fluxo mássico, sensores baseados no peso do produto e sensores ópticos e sensores nucleares.

Cerri e Magalhães, (2003) descrevem um monitor de produtividade para cana-de-açúcar. O sistema desenvolvido utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um Sistema de Posicionamento Global (“Global Positioning System” – GPS) instalado na colhedora, permitem com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica - SIG a elaboração de um mapa digital que representará a superfície de produção para a área colhida.

Em relação aos fatores relacionados à produção, um importante ponto são os atributos físicos e químicos do solo. Tais atributos além de variar no espaço, podem variar no tempo, para uma dada posição no espaço (BERNOUX, 1998). Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades que em outras (BRAGATO e PRIMAVERA, 1998; SLOT et al., 2001).

A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão.

Do que foi apresentado pode-se sugerir que a quantificação da variabilidade espacial da produtividade e dos atributos físicos e químicos do solo são essenciais para o gerenciamento de uma cultura e que por meio dessas informações é possível o seu mapeamento dos atributos em questão e elaboração de mapas de prescrição. Goering (1993) e Goering & Hans (1993) partem do princípio que, levando-se em conta a variabilidade natural dos fatores de produção,

pode-se aplicar apenas as quantidades efetivamente necessárias em cada ponto de acordo com um mapa de prescrição, previamente elaborado e que, portanto, as técnicas de aplicação localizada de insumos se tornam muito importantes para uma agricultura rentável. Este conceito é evidenciado pelo trabalho de Borgelt (1994), o qual depois de amostrar o pH do solo de uma área de 8,8 hectares, concluiu que sem a utilização da técnica de aplicação localizada, 9 a 12% dessa área receberia uma quantidade de calcário acima da recomendada e 37 a 41% receberia uma quantidade abaixo da recomendada.

Esta pesquisa tem como objetivo principal mapear a produtividade da cana-de-açúcar e correlacioná-la com os atributos físicos e químicos do solo visando encontrar subsídios para uma aplicação de insumos de forma mais adequada e economicamente vantajosa. Para atingir o objetivo selecionou-se uma área teste de 42 ha da Usina São João de Araras, SP e utilizou-se um monitor de produtividade desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP, o qual é denominado de SIMPROCANA.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

7.4.1 Área de estudo e base de dados utilizada

As descrições da área de estudo e dos dados dos atributos físicos e químicos do solo da segunda amostragem de solo utilizados nesta pesquisa já foram apresentados em detalhes, respectivamente nos itens 3 e 4.4.2 desta tese.

7.4.2 Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar

Para o mapeamento de produtividade da cultura da cana-de-açúcar utilizou-se o monitor de produtividade desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP descrito no item 6 desta tese.

Essa etapa consistiu em mapear o rendimento da cultura e ao mesmo tempo, avaliar a acurácia do sistema desenvolvido.

7.4.2.1 Avaliação da acurácia dos dados de produtividade da cana-de-açúcar

Para avaliar a acurácia dos dados de produtividade obtidos pelo sistema desenvolvido comparou-se o peso da cana medido pela balança do monitor com aquele obtido pela pesagem do transbordo no campo.

A cana-de-açúcar depois de colhida era transferida para um conjunto composto de um transbordo dianteiro e um traseiro tracionado por um trator (Figura 58). Na colhedora, uma pessoa era responsável pelo registro do início e fim do processo de colheita e transferência para cada transbordo.



Figura 58. Colhedora em operação e transferência da cana para o conjunto de transbordos.

O conjunto em seguida era pesado, utilizando uma balança da marca VESTA modelo 3402A, específica para pesagem de veículos (Figura 59). Pesou-se 134 conjuntos, ou seja, 268 transbordos. Cada conjunto foi inicialmente pesado sem carga para se obter a tara. A cada operação registrava-se individualmente o peso do trator e de cada transbordo com a finalidade de eliminar-se possíveis erros devido a transferência de peso entre os veículos.



Figura 59. Pesagem do transbordo utilizando células e carga.

Os dados provenientes da pesagem da carga de cada um dos 268 transbordos foram considerados como **peso real**. Os dados obtidos pelo sistema desenvolvido durante o carregamento de cada transbordo foram considerados como **peso calculado**. A partir desses dois pesos, calculou-se o fator de correção (peso real dividido pelo peso calculado) a ser aplicado aos dados coletados pelo SIMPROCANA, a fim de tornar o mapa de produtividade final mais próximo da realidade.

Para avaliar a acurácia do sistema desenvolvido aplicou-se aos fatores de correção a análise estatística descritiva.

7.4.2.2 Mapa de produtividade da cana-de-açúcar

A área a ser mapeada foi dividida em seções menores, denominadas células. De acordo com Han et al. (1994) as dimensões dessas células devem obedecer a determinados valores, como por exemplo, velocidade e tamanho da colhedora, capacidade de leitura e aquisição de dados do sistema de medição e posicionamento. Adotando-se uma velocidade da colhedora de $1,38 \text{ m.s}^{-1}$, uma distância entre linhas da cana de 1,5 m e uma taxa de aquisição de 10 s, estimou-se em aproximadamente 20 m^2 o tamanho médio das células.

Utilizando-se a colhedora já instrumentada, a produtividade da cana-de-açúcar foi medida em cada uma dessas células, em um talhão de 42 ha, gerando-se um arquivo TXT contendo as seguintes variáveis: a) número da aquisição, b) horário, c) latitude e longitude em

UTM do ponto central de cada célula, d) peso médio medido durante 10 segundos (kgf), e) velocidade da colhedora ($m.s^{-1}$), f) ângulo do elevador ($^{\circ}$), g) velocidade da esteira do elevador ($m s^{-1}$), h) peso acumulado e corrigido em função da velocidade e ângulo de inclinação do elevador da colhedora nos 10 segundos, i) área colhida (m^2), j) produtividade ($t ha^{-1}$), k) “status” de manobra, ou seja, quando “status” for igual a 1 a colhedora está em manobra e 0 (zero) quando colhendo e l) sinalizações (“flags”) usadas para registrar a presença de plantas daninhas ou falhas no stand da cultura.

Os arquivos em formato TXT foram transformados em um único arquivo para serem tabulados em uma planilha Excel. Devido a automação e a alta quantidade de informações obtidas, diversos erros podem ocorrer no processo de coleta. A eliminação destes erros é um fator importante na obtenção de um resultado de boa qualidade (BLACKMORE & MARSHALL, 1996). Assim, antes de se gerar o mapa de produtividade realizou-se a fase de filtragem dos dados brutos a fim de eliminar os erros presentes. Como primeira etapa do processo de filtragem, foi realizada a análise e a caracterização dos erros presentes. Os seguintes erros foram encontrados: a) Erros de posicionamento representados por pontos fora do talhão, no entanto, erros pequenos de posicionamento não puderam ser detectados, b) Pontos com produtividade nula ou negativas, c) Pontos com posição repetida e d) Pontos com valores de produtividade fora dos limites estabelecidos de acordo com metodologia proposta por Tukey (1977), o qual determina os limites superior e inferior para dados discrepantes baseando-se no primeiro e terceiro quartil, conforme Equação 7 e 8

$$LS = QS + 1,5. AI \quad \text{Eq. 7}$$

$$LI = QI - 1,5. AI \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

LS é o limite superior

LI é o limite inferior

QS é o quartil superior

QI é o quartil inferior

AI é a amplitude interquartilica

Após a remoção dos erros e um novo arquivo foi criado com extensão DBF, o qual foi utilizado pelo programa de informação geográfica ArcGis 8.3 para confecção do mapa de produtividade do talhão.

Adotou-se um fator de correção para todos os dados a fim de tornar o mapa de produtividade o mais próximo possível da realidade. Esta necessidade foi verificada durante os ensaios de avaliação da acurácia dos dados de produtividade (item 7.4.2.1).

Com o auxílio do Geostatistical Analyst do programa ArcGis os pontos foram interpolados digitalmente, utilizando-se técnicas de geoestatística, como a krigagem e o Peso do Inverso da Distância (IDW). Como resultado final produziu-se um mapa digital que representa a produtividade da área colhida.

7.4.3 Correlação entre atributos físicos e químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar

Para relacionar a produtividade da cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo utilizou-se o índice de correlação linear (nível de 5% de significância). O primeiro passo para essa correlação foi atribuir um valor de produtividade para cada ponto da malha de amostragem do solo (MOLIN, 2001b). Para isso, utilizando-se o programa ArcGis, o mapa com a distribuição espacial dos pontos de amostragem do solo foi sobreposto ao de produtividade não interpolado (Figura 60). Para cada ponto de amostragem de solo criou-se um círculo de 50m de raio. Todos os pontos de produtividade contidos na área do círculo foram somados a fim de calcular uma média. Essa média foi atribuída a cada ponto de amostragem de solo, constituindo uma única planilha com informações sobre a latitude, longitude, altitude, pH (H₂O), pH (CaCl₂), H⁺+Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P, N, C, resistência a penetração (R.P) e produtividade.

7.4.4 Recomendação de aplicação variada de calcário, fósforo e potássio

Uma das fases necessárias para a aplicação localizada de insumos é o mapa de prescrição. Este mapa contém informações sobre as quantidades necessárias de insumos que cada ponto da área deve receber. levando-se em consideração diversos fatores que influenciam na produtividade da cultura tais como a fertilidade e o tipo de solo. Baseando-se nesse

princípio, essa etapa da pesquisa consistiu em comparar o método de aplicação de insumos, pela média, adotado pela usina, com o método de aplicação variada que leva em consideração a análise de solo na grade adotada. Seis simulações baseadas nas recomendações do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para cana-soca foram realizadas para comparar os dois métodos. A primeira visou elevar a saturação por bases a 60% através de uma aplicação de calcário em taxa fixa. A segunda consistiu em elevar a saturação por bases a 60%, porém através de uma aplicação em taxa variável de calcário. A terceira e a quarta simulações tiveram como objetivo a aplicação de fósforo (P_2O_5) em taxa fixa e variável respectivamente. A taxa fixa foi calculada em função do teor médio do talhão e para variada as dosagens foram definidas de acordo com a disponibilidade do nutriente no solo. Finalmente, a quinta e a sexta simulações consistiram na aplicação de potássio (K_2O) em taxa fixa e em variável respectivamente. Assim como as simulações anteriores, a taxa fixa foi calculada em função do teor médio de K do talhão. Para a variada, as dosagens foram definidas de acordo com a disponibilidade do nutriente (K) no solo.

O primeiro passo, para a realização das simulações, consistiu em transformar os mapas de superfície da variabilidade espacial dos atributos do solo, saturação por base (V%), fósforo e potássio, (item 4.4.2) em mapas tipo “grid” de 25 x 25 m. Cada célula do “grid” representa uma área de 0,0625 ha. No segundo passo calculou-se, para cada uma das células do “grid”, as quantidades de calcário, fósforo e potássio que deveriam ser aplicados de acordo com as recomendações do IAC, (1996). Os valores calculados foram utilizados para gerar os mapas de prescrição de cada atributo, simulando uma aplicação em taxa variada. Para a aplicação em taxa fixa adotou-se como dosagem a média de cada atributo no talhão.

Segundo o Boletim 100 do IAC a quantidade de calcário necessária, para elevar a saturação por bases do solo de um valor atual, V_1 , a um valor maior V_2 , é calculada pela Equação 9.

$$NC \equiv \frac{CTC(V_2 - V_1)}{10 PRNT} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde NC é a necessidade de calagem ($t\ ha^{-1}$); CTC é a capacidade de troca de cátions do solo ($mmol_c\ dm^3$) e $PRNT$ é o poder reativo de neutralização total do calcário a ser utilizado como corretivo.

A Tabela 13 mostra a recomendação de fósforo e potássio para cultura da cana-de-açúcar em função de sua produtividade esperada.

Tabela 13. Tabela de recomendação de P₂O₅ e K₂O para cultura da cana-de-açúcar.

Produtiv/e esperada (t/ha)	P resina, mg/dm ³		K ⁺ trocável, mmolc/dm ³		
	0-15	> 15	0-1,5	1,6-3,0	> 3,0
	P ₂ O ₅ (kg/ha)		K ₂ O (kg/ha)		
≤ 60	30	0	90	60	30
60-80	30	0	110	80	50
80-100	30	0	130	100	70
> 100	30	0	150	120	90

Fonte: IAC, (1996)

Finalmente, o terceiro passo consistiu em comparar os dois modos de aplicação (taxa fixa e variável) quanto a redução da dosagem e custo de cada insumo.

Para os cálculos de custo na aquisição de cada insumo foram utilizados os valores fornecidos pelo AGRIANUAL, (2004).

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.5.1 Atributos físicos e químicos do solo

Os resultados e os mapas de variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo estão apresentados em detalhe no item 4.5 desta tese.

7.5.2 Avaliação da acurácia dos dados de produtividade da cana-de-açúcar

A Tabela 14 é uma amostra dos dois pesos coletados, **peso real** proveniente da pesagem de cada um dos 268 transbordos e **peso calculado** obtido pelo sistema desenvolvido durante o carregamento de cada transbordo.

Tabela 14. Amostra dos conjuntos analisados do ensaio para avaliação da acurácia do sistema.

Carga	Trator	Transbordo da Frente						Transbordo Traseiro					
		TF	TF REAL	TF CALC	ERRO	FC	TF Corr	TT	TT REAL	TT CALC	ERRO	FC	TT Corr
1	620	14364	7052	6594	458	1,07	7049	12800	6436	6581	-145	0,98	6436
2	613	15088	7564	6045	1519	1,25	7562	13176	6656	6022	634	1,11	6657
3	620	15676	8364	5813	2551	1,44	8365	13462	7098	6315	783	1,12	7096
4	620	14412	7100	6765	335	1,05	7102	12180	5816	4900	916	1,19	5815
5	613	14836	7312	7182	130	1,02	7310	12616	6096	5864	232	1,04	6098
6	620	14920	7608	7499	109	1,01	7609	13860	7340	6634	706	1,11	7341
7	613	14424	6900	7090	-190	0,97	6902	13192	6672	6961	-289	0,96	6670
8	620	14206	6894	6764	130	1,02	6892	12652	6288	6518	-230	0,96	6287
9	619	13846	6242	6112	130	1,02	6243	12612	6150	6626	-476	0,93	6152
10	620	13668	6356	5148	1208	1,23	6358	13084	6720	4729	1991	1,42	6721
11	619	14304	6700	5701	999	1,18	6698	13708	7246	5745	1501	1,26	7244
12	620	15022	7710	5318	2392	1,45	7711	12188	5824	4525	1299	1,29	5823
13	615	14726	7258	6782	476	1,07	7260	12262	5936	5936	0	1,00	5938
14	620	14400	6876	5682	1194	1,21	6874	13388	7024	5685	1339	1,24	7025
15	615	14056	6588	7750	-1162	0,85	6587	12300	5974	8607	-2633	0,69	5973
16	620	15328	8016	9322	-1306	0,86	8016	12816	6452	7494	-1042	0,86	6452
17	615	14372	6904	7694	-791	0,90	6902	12720	6394	7354	-960	0,87	6390
18	620	15588	8276	8596	-320	0,96	8278	14152	7788	8520	-732	0,91	7787
19	619	14652	7048	5961	1087	1,18	7050	13310	6848	5031	1817	1,36	6846
20	620	14584	7272	5735	1537	1,27	7270	13084	6720	4459	2261	1,51	6719
21	619	14874	7270	6636	634	1,10	7271	13918	7456	4908	2548	1,52	7458
22	620	14024	6712	6064	648	1,11	6714	13780	7416	5835	1581	1,27	7417
23	619	15432	7828	5977	1851	1,31	7826	13492	7030	5604	1426	1,25	7028
24	613	14260	6736	6488	248	1,04	6735	13324	6804	6623	181	1,03	6802
25	619	14262	6658	5699	959	1,17	6660	13074	6612	5507	1105	1,20	6614

TF é o peso total do transbordo da frente

TF REAL é o peso de cana do transbordo da frente após correção transferência de peso

TF CALC é o peso de cana do transbordo da frente determinado pelo sistema desenvolvido

ERRO é a diferença entre TF REAL e TF CALC

FC é o fator de correção

TF Corr é o peso de cana do transbordo da frente determinado pelo sistema após uso do fator de correção

TT é o peso total transbordo traseiro

Os resultados da análise estatística encontram-se na Tabela 15 onde o fator de correção foi utilizado como índice de acurácia do sistema.

Tabela 15. Parâmetros estatísticos calculados para o fator de correção (FC) obtidos no ensaio de avaliação da acurácia dos dados de produtividade.

Parâmetros	FC
Média	1,09
Mediana	1,07
Mínimo	0,62
Máximo	1,71
Curtose	-0,22
Variância	0,05
Desv. Padrão	0,22
CV (%)	20,45

Analisando-se a Tabela 15 verifica-se que a média dos fatores de correção foi de 1,09 o que equivale a 9% de erro com um coeficiente de variação (CV) de 20,45%.

Devido a alguns fatores como: o tamanho das plataformas de pesagem serem menores que a largura do pneu dos transbordos, a dificuldade de posicionar seus pneus sempre no centro de cada plataforma e a irregularidade do solo, pôde-se verificar que o peso indicado pelas plataformas de pesagem para o mesmo transbordo com a mesma carga poderia variar de 400 a 1000 kg, o que significa um erro de 5 a 12,5 % gerado pela própria plataforma de pesagem. Este erro pode ser confirmado pelos resultados da comparação entre os pesos dos transbordos e o peso do caminhão obtido na balança da usina (Tabela 16).

Tabela 16. Comparação dos pesos obtidos pela pesagem do caminhão na balança da usina com os do transbordo pesado em campo, utilizando-se as plataformas de pesagem.

Repetição	Transbordo	Caminhão	Erro	Erro
	----- kg -----			%
1	60654	57590	3064	5.3
2	57536	56060	1476	2.6
3	58958	53980	4978	9.2
4	54572	52940	1632	3.1
5	65774	58030	7744	13.3
6	61726	57700	4026	7.0
7	61178	54800	6378	11.6
8	58536	57130	1406	2.5
9	57071	51580	5491	10.6
10	52327	49290	3037	6.2
11	57248	54740	2508	4.6
12	62858	57150	5708	10.0

A partir das informações obtidas nesse ensaio e no item 6.5.2 fica evidente que as plataformas de pesagem utilizadas para pesagem do transbordo em campo apresentaram valores médios maiores que os calculados pelo SIMPROCANA e os indicados pela balança da usina. Comparando-se os pesos obtidos pelo SIMPROCANA e pela balança da usina (item 6.5.2), verifica-se que os erros foram menores e em torno de 0,9 %. Isto gerou uma dúvida sobre a confiabilidade das plataformas de pesagem como método para verificar a acurácia do sistema desenvolvido e portanto adotou-se como padrão o peso medido pela balança da usina.

Futuros ensaios deverão ser realizados para verificar a acurácia das plataformas de pesagem.

7.5.3 Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar

A Figura 60 evidencia os pontos georreferenciados ao final do processo de filtragem dos dados.

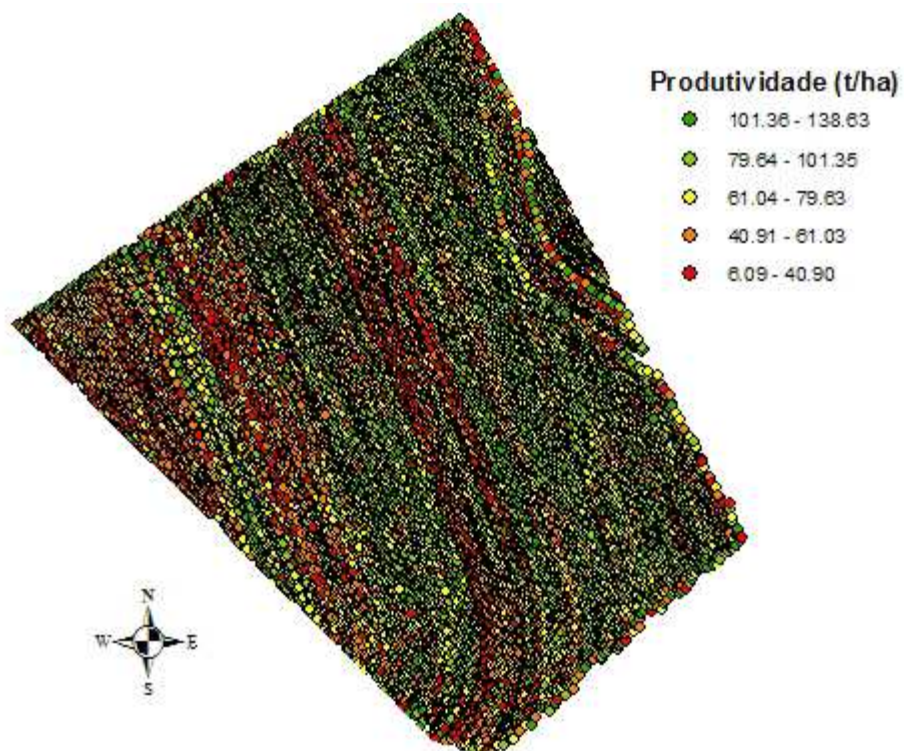


Figura 60. Produtividade ($t\ ha^{-1}$) da cana-de-açúcar nos locais georreferenciados relativos aos dados filtrados.

A Figura 61 representa os pontos georreferenciados onde foram analisadas a produtividade da cana-de-açúcar após a aplicação do fator de correção de 1,09.

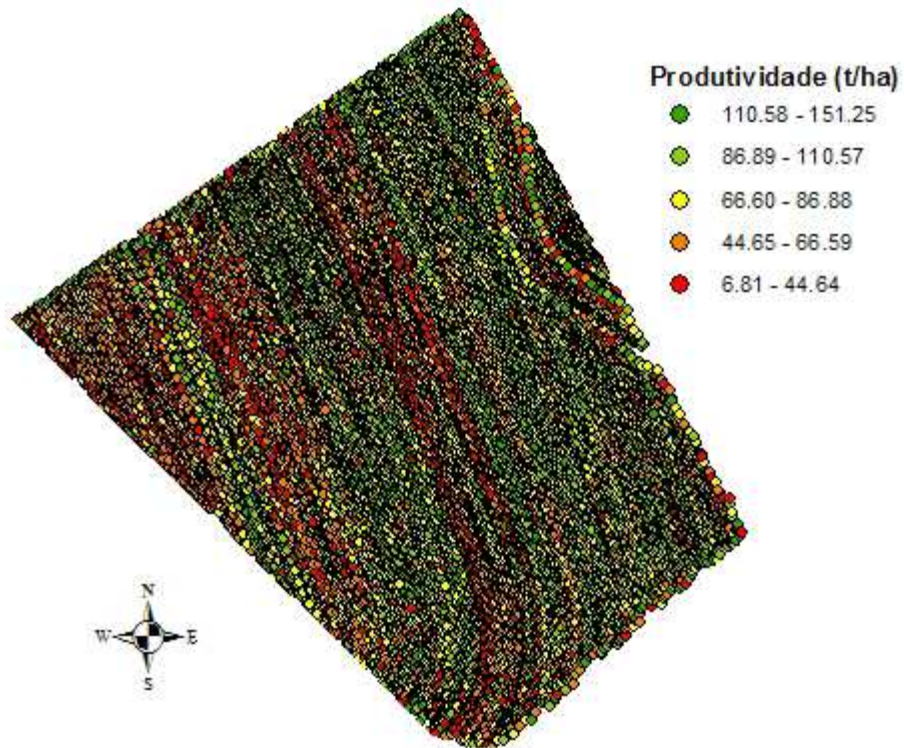


Figura 61. Produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) após a aplicação do fator de correção.

A Figura 62 e 63 mostram respectivamente o mapa de produtividade da cana-de-açúcar, sem a aplicação do fator de correção e após a aplicação do fator, obtido pelo método da krigagem em blocos. A Figura 64 mostra o mapa de produtividade, após a aplicação do fator de correção, para cultura de cana-de-açúcar, obtido pelo método do Peso do Inverso da Distância (IDW).

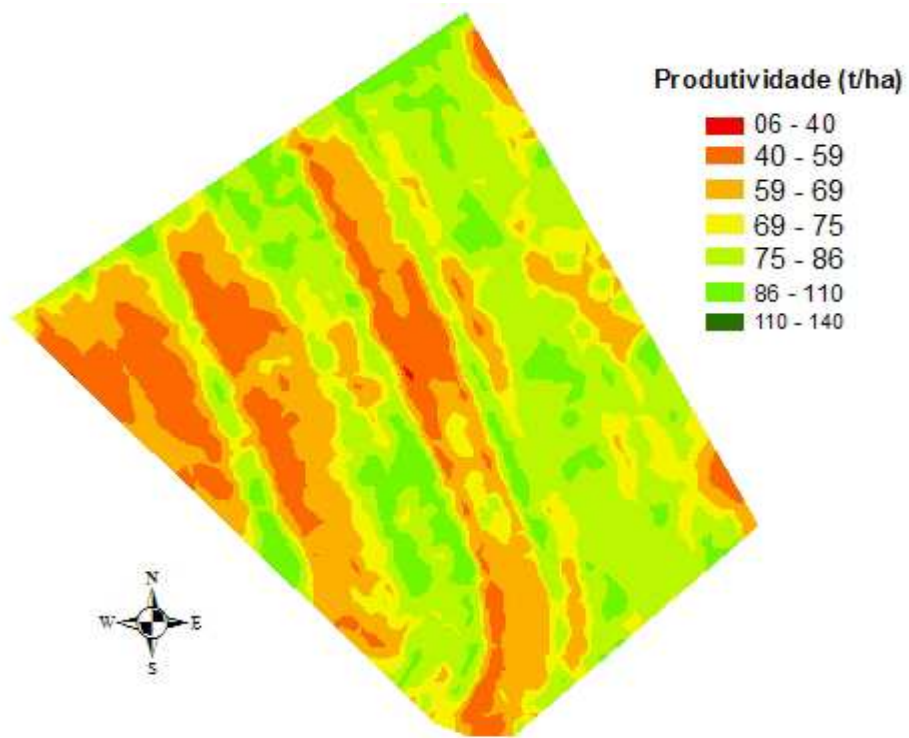


Figura 62. Mapa de produtividade sem a aplicação do fator de correção por krigagem.

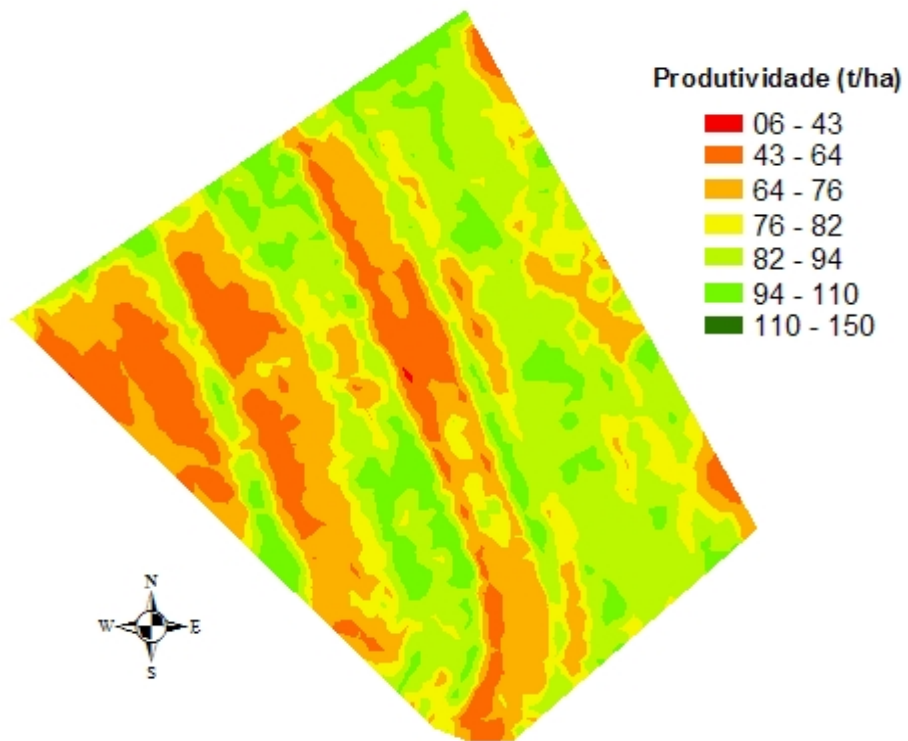


Figura 63. Mapa de produtividade após a aplicação do fator de correção por krigagem.

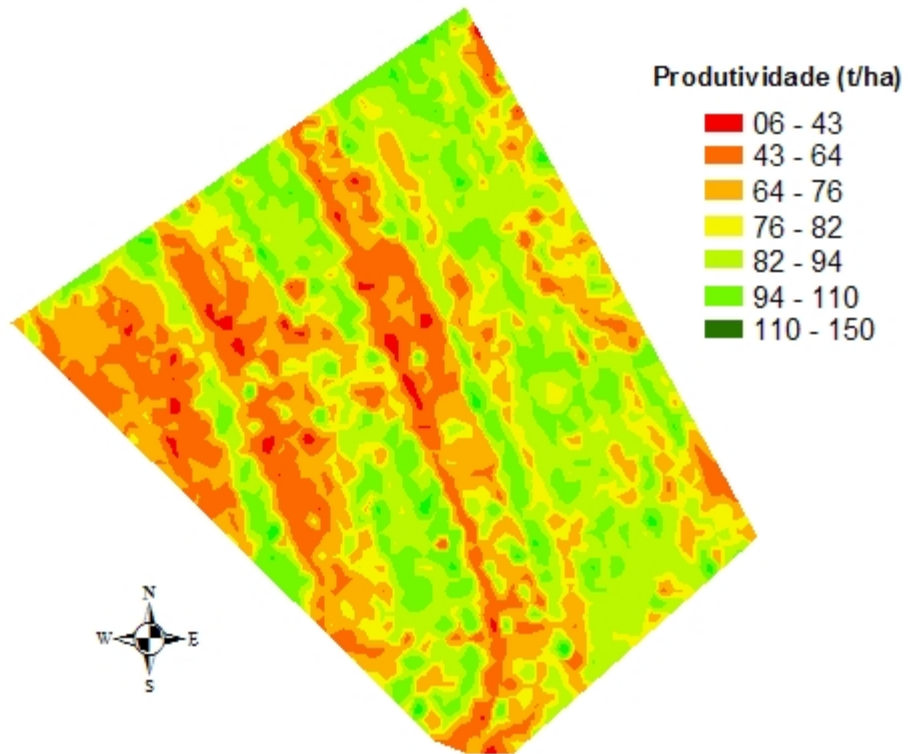


Figura 64. Mapa de produtividade após a aplicação do fator de correção por IDW.

A validação cruzada foi utilizada para indicar o melhor modelo comparando-se os gerados pelo método da krigagem e IDW. O resultado dessa comparação pode ser visto na Figura 65.

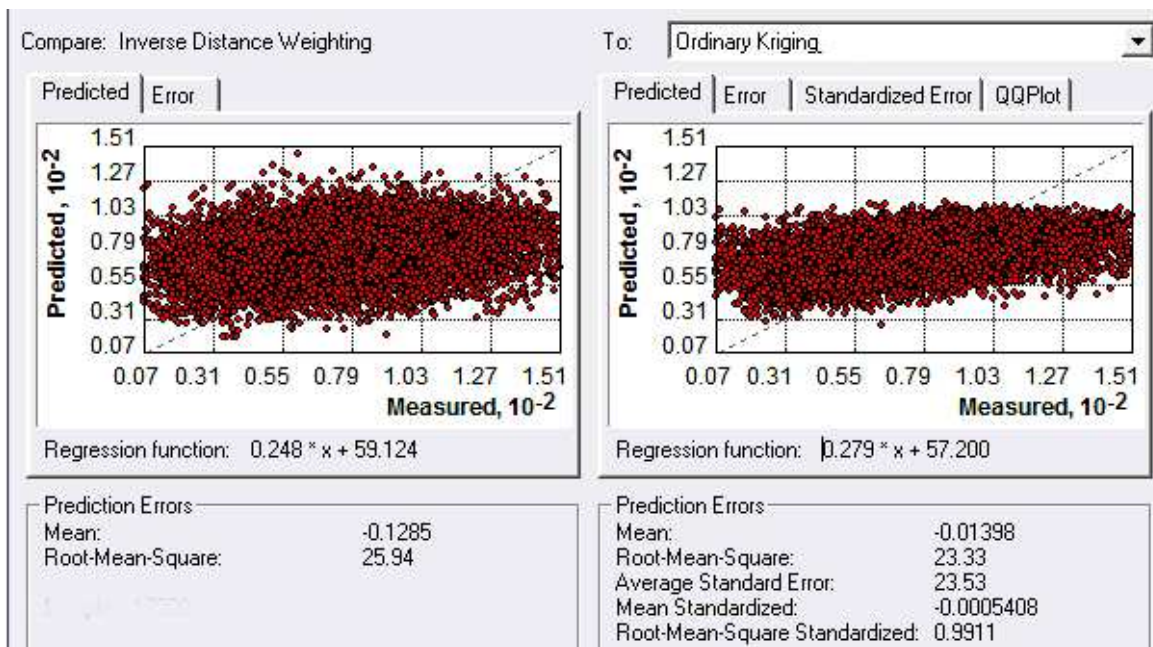


Figura 65. Comparação entre as validações cruzada utilizada para comparar os modelos gerados pelo método IDW e da krigagem.

Baseando-se nos erros da Figura 65 pode se afirmar que o método da Krigagem apresentou ser o melhor, pois a média de erros obtidos foi de $-0,01398$ enquanto que para o método IDW foi de $-0,1285$. Portanto, utilizou-se o mapa de produtividade com fator de correção e interpolado pelo método da krigagem como sendo o mapa final e conseqüentemente usado para o processo de análise e interpretação dos resultados.

Pode-se observar, pelo mapa mostrado na Figura 63 e pelo histograma da Figura 66, que os valores entre 64 e 94 t ha^{-1} são as mais representativas com $48,47 \%$ da área colhida. Observa-se que os valores entre 6 e 64 t ha^{-1} surgem em pontos isolados formando ilhas de baixa produtividade, cujas razões serão investigadas através de correlações com as propriedades físicas e químicas do solo.

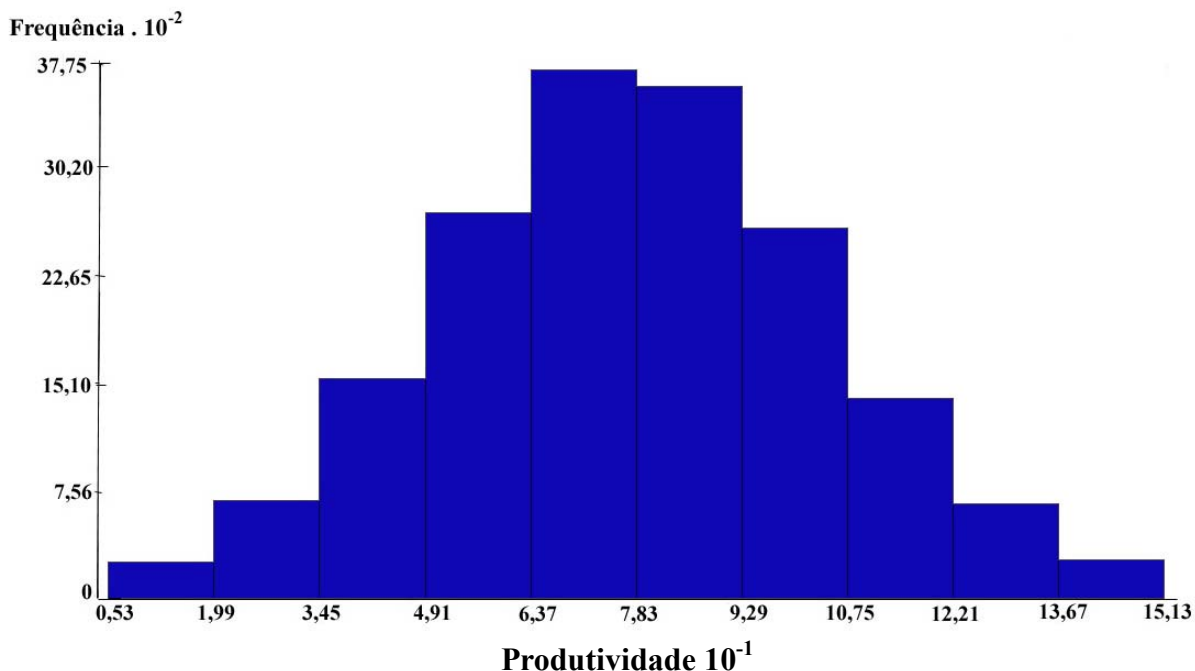


Figura 66. Histograma dos dados de produtividade em t ha⁻¹ de cana-de-açúcar.

7.5.4 Correlação entre atributos físicos e químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar

Nas Tabelas 17 e 18 estão a matriz de correlação linear de produtividade da cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo obtidas, respectivamente, para as camadas 0 a 10 e 10 a 20 cm. As variáveis analisadas foram: pH em água, pH em CaCl₂, nitrogênio (N), carbono (C), relação carbono nitrogênio (C/N), resistência a penetração (R.P.), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), hidrogênio mais alumínio (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por base (V%) e Produtividade.

Analisando as Tabelas 17 e 18 verifica-se que os coeficientes de correlação resultaram em valores baixos (< 0,5), confirmando a tendência que vem sendo observada por diversos autores (VIANA da MATA et al., 1999; YANAI et al., 2001; VIEIRA e MOLIN, 2001) e inclusive pelo item 5.4.3 desta pesquisa.

O atributo carbono e conseqüentemente a matéria orgânica (MO) foram as que apresentaram coeficientes mais elevados para a camada 0 a 10 cm, aproximadamente 0,45. Embora tenham ocorrido baixas correlações (< 0,5), estas evidenciam algumas tendências. O

nitrogênio (N) apresentou uma correlação linear em torno de 0,3 com a produtividade para as duas camadas de profundidade.

Correlações negativas também ocorreram para as propriedades químicas Ca e pH, porém com coeficientes menores e em torno de 0,2 a 0,3.

Tabela 17. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para a camada 0 a 10 cm.

	pH (água)	pH (CaCl)	N	C	C/N	R.P.	MO	P	K	Ca	Mg	H	SB	CTC	V %	Produtividade
pH (água)	1															
pH (CaCl)	0,680	1														
N	0,239	0,253	1													
C	0,205	0,143	0,935	1												
C/N	-0,243	-0,440	-0,435	-0,138	1											
R.P.	-0,122	-0,099	-0,343	-0,328	0,073	1										
MO	0,162	0,106	0,825	0,900	-0,113	-0,263	1									
P	0,219	0,407	0,225	0,128	-0,374	0,065	0,103	1								
K	0,144	0,160	0,259	0,194	-0,313	-0,197	0,117	0,166	1							
Ca	0,708	0,819	0,517	0,439	-0,444	-0,186	0,422	0,552	0,145	1						
Mg	0,775	0,739	0,470	0,441	-0,267	-0,281	0,411	0,184	0,011	0,829	1					
H	-0,699	-0,764	0,054	0,150	0,361	-0,028	0,199	-0,293	-0,194	-0,607	-0,536	1				
SB	0,756	0,828	0,532	0,462	-0,421	-0,229	0,437	0,469	0,159	0,987	0,904	-0,614	1			
CTC	0,530	0,581	0,695	0,665	-0,311	-0,302	0,663	0,411	0,084	0,872	0,811	-0,174	0,884	1		
V %	0,789	0,893	0,293	0,198	-0,455	-0,134	0,169	0,386	0,191	0,899	0,829	-0,851	0,915	0,637	1	
Produtividade	-0,053	-0,290	0,333	0,407	-0,041	-0,267	0,440	-0,242	-0,004	-0,059	0,011	0,317	-0,040	0,138	-0,154	1

Tabela 18. Matriz de correlação linear entre produtividade e os atributos do solo para a camada 10 a 20 cm.

	pH (água)	pH (CaCl)	N	C	C/N	R.P.	MO	P	K	Ca	Mg	H	SB	CTC
pH (água)	1													
pH (CaCl)	0,839	1												
N	-0,152	-0,007	1											
C	-0,212	-0,122	0,924	1										
C/N	-0,078	-0,245	-0,059	0,266	1									
R.P.	0,052	0,141	-0,235	-0,243	0,093	1								
MO	-0,216	-0,127	0,854	0,884	0,167	-0,206	1							
P	0,296	0,411	0,062	-0,042	-0,304	-0,078	0,145	1						
K	0,298	0,309	-0,140	-0,230	-0,293	-0,112	-0,251	0,038	1					
Ca	0,627	0,784	0,236	0,130	-0,230	-0,013	0,199	0,654	0,119	1				
Mg	0,589	0,746	0,223	0,147	-0,145	-0,069	0,127	0,414	0,007	0,882	1			
H	-0,809	-0,867	0,213	0,311	0,216	-0,230	0,229	-0,440	-0,270	-0,704	-0,600	1		
SB	0,641	0,802	0,231	0,128	-0,221	-0,036	0,170	0,595	0,130	0,990	0,938	-0,698	1	
CTC	0,288	0,465	0,468	0,399	-0,144	-0,214	0,396	0,491	-0,018	0,838	0,842	-0,227	0,856	1
V %	0,768	0,898	0,066	-0,061	-0,268	0,026	-0,015	0,537	0,242	0,939	0,860	-0,844	0,945	0,676
Produtividade	-0,178	-0,343	0,339	0,371	0,164	-0,223	0,321	-0,266	-0,128	-0,243	-0,107	0,458	-0,211	0,043

7.5.5 Recomendação de aplicação variada de calcário, fósforo e potássio

De acordo com o item 7.4.5 para poder comparar os dois métodos de aplicação, em taxa fixa e variável, seis simulações foram feitas.

Os resultados da simulação de aplicação em taxas fixas e variáveis podem ser vistos na Tabela 19, a qual mostra a quantidade de calcário, fósforo e potássio que deveriam ser aplicados no talhão de 42ha.

Tabela 19. Dosagens calculadas para aplicação de calcário, fósforo e potássio em taxas fixas e variáveis em 42 ha.

Aplicação	K ₂ O (KCl)	P ₂ O ₅ (SPS)	Calcário
		t	
Fixa	5,6 (9,3)	1,3 (7,20)	22,5
Variável	5,1 (8,5)	0,37 (2,05)	22,2

Adotando-se como fonte de fósforo o fertilizante super fosfato simples (SPS) que possui 18 % de P₂O₅ a quantidade necessária desse fertilizante para uma aplicação em taxa variável é de 2,05 t e para taxa fixa é de 7,2 t. O mesmo acontece para o potássio onde foi adotado como fertilizante o cloreto de potássio (KCl), o qual possui 60 % de K₂O em sua composição. Portanto, a quantidade necessária desse fertilizante para uma aplicação em taxa variável é de 8,5 t e para taxa fixa é de 9,3 t.

Os dados de fósforo e potássio mostrados na Tabela 19 foram obtidos através dos mapas de prescrição desses insumos e podem ser vistos nas Figuras 67 e 68.

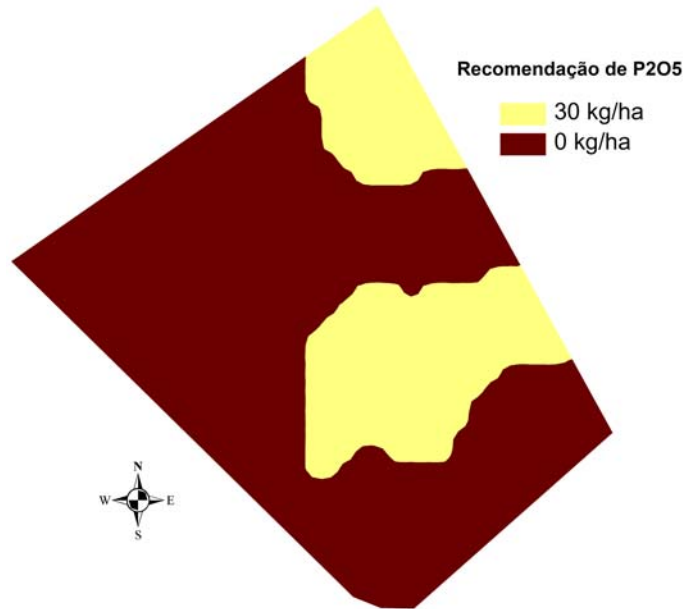


Figura 67. Mapa de prescrição de fósforo (P₂O₅) para o talhão de 42 ha.

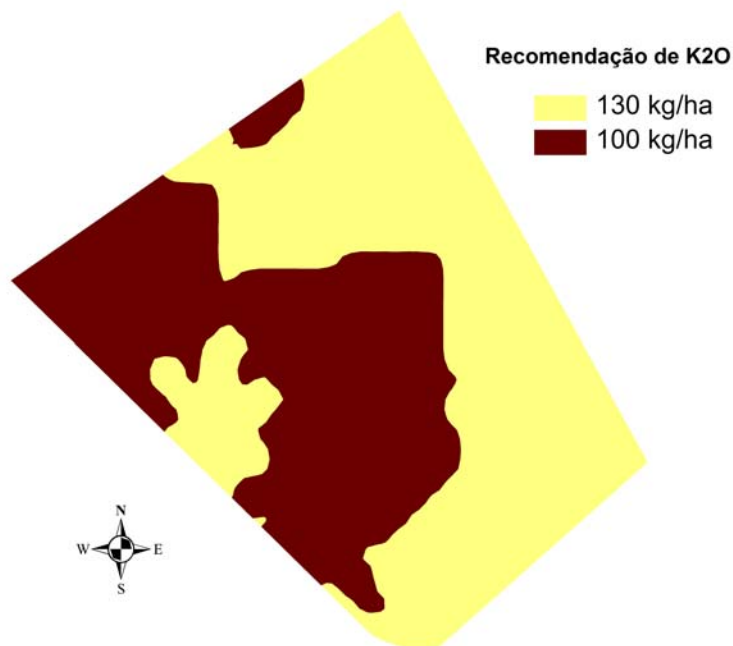


Figura 68. Mapa de prescrição de potássio (K₂O) para o talhão de 42 ha.

Analisando-se a Tabela 19 e as Figuras 67 e 68 pode se verificar que a aplicação de fósforo (P₂O₅) em taxa variável foi a que apresentou significativa redução na dose recomendada comparando com a aplicação feita pela média. Aplicando-se P₂O₅ de forma

localizada a redução desse insumo é da ordem de 71,5 %. Considerando o preço do SPS de R\$ 450,00 t⁻¹ a usina estaria economizando nessa área de estudo R\$2.317,00 ou R\$55,00 ha⁻¹.

O potássio apresentou uma redução de 8,9 % na dose de K₂O em área total. Sendo que o preço do KCl é de R\$900,00 t⁻¹ a redução seria de R\$720,00 ou R\$17,00 ha⁻¹.

O calcário foi o que apresentou a menor diferença de dosagem comparando-se os dois métodos de aplicação. Aplicando-se calcário a taxa variável nessa área a redução é de 1,3 %. Como o calcário ainda não possui um custo tão elevado quantos os demais insumos essa redução a primeira análise não parece tão significativa. O calcário a um custo de R\$52,5 t⁻¹ teria uma economia de R\$15 nos 42 ha.

Além do fator econômico as diferenças encontradas entre os dois métodos de aplicação acarretam problemas agrônômicos. No caso do calcário embora a dosagem final para área total não tenha sido significativamente diferente, 52% da área foi aplicada com uma dosagem abaixo do que seria recomendado e 45% seria aplicado com uma taxa acima da recomendada e apenas 3% seria aplicado com uma dosagem igual à recomendada. Fato também observado por Borgelt et al., (1994).

Segundo Rajj, (1987) dosagens de calcário abaixo da recomendada diminuem os benefícios desse insumo no solo como: diminuição da fixação de fósforo, diminuição dos efeitos tóxicos do Al, Mn e Fé e fornecimento de Ca e Mg como nutrientes. Já taxas muito acima podem acarretar uma menor disponibilidade de alguns micronutrientes.

As diferenças entre as dosagens recomendadas e a aplicada em função da média também foram observados para o fósforo e potássio. Além dessas desigualdades a redução do consumo desses insumos gera uma redução do uso de horas-máquina, uma vez que não há a necessidade de trafegar com os equipamentos onde não há aplicação a ser feita, como no caso do fósforo (Figura 67). No entanto, essa abordagem não foi adotada nesta pesquisa.

7.6 CONCLUSÕES

O monitor de produtividade desenvolvido possibilitou a identificação da variabilidade espacial da produtividade da cultura de cana-de-açúcar em uma área de 42 ha.

O erro médio dos dados de produtividade de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 9% .

O uso das balanças de campo para pesagens dos transbordos como verificação da acurácia do sistema desenvolvido precisa ser melhor avaliado, pois essas balanças também podem apresentar erros.

As correlações de produtividade de cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo apresentaram baixos valores, menor que 0,5. Esta informação sugere que outras propriedades além das de solo sejam analisadas como incidência de plantas daninhas, distribuição de água dentro do talhão, incidência de luz solar, drenagem entre outros.

A recomendação de aplicação de calcário, fósforo e potássio em taxas variáveis apresentaram um ganho de aproximadamente R\$3.000,00 na área total ou R\$72,00 por hectare.

8. DISCUSSÃO GERAL

A presente pesquisa baseou-se na hipótese de que a variabilidade espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar está relacionada com os atributos físicos e químicos do solo. Análises e mapeamento desses atributos associado ao mapa de produtividade gerado por uma colhedora especialmente instrumentada para essa finalidade, se constituíram nas duas principais ações simultâneas adotadas para a constatação dessa hipótese.

O bloco diagrama apresentado na Figura 69 representa síntese das atividades desenvolvidas nessa pesquisa.

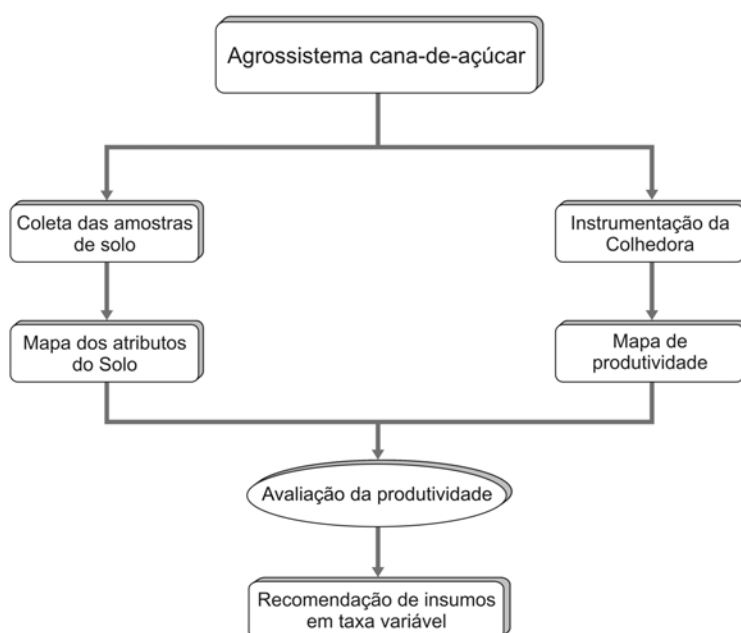


Figura 69. Diagrama em blocos contendo as principais atividades desta pesquisa.

A seguir será apresentada uma breve discussão geral de cada uma das principais fases que compõem essa pesquisa e finalmente uma interligação dessas várias etapas.

8.1 Coleta de solo e análise de seus atributos para fins de mapeamento

A Figura 70 representa a seqüência de atividades realizadas para a geração dos mapas dos atributos físicos e químicos do solo. Essas atividades, descritas com detalhes no capítulo 4, constituem etapa indispensável às demais fases desta tese.

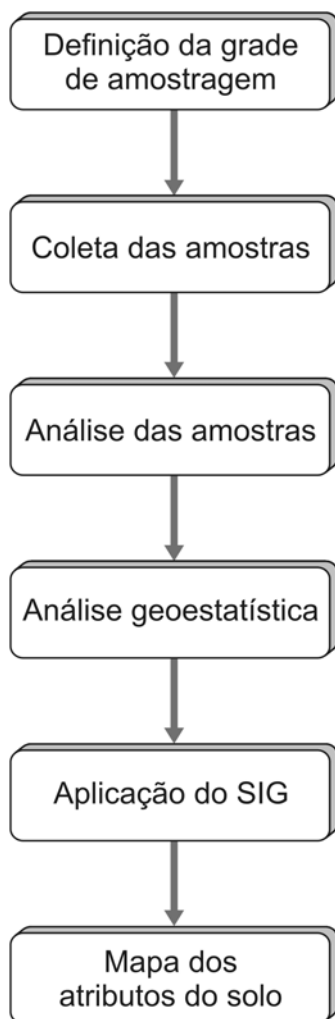


Figura 70. Diagrama em blocos das atividades realizadas para a geração dos mapas dos atributos físicos e químicos do solo.

No ano de 2003 foram coletadas 170 amostras na área de 42ha em malha regular de 50 x 50m. Essas amostras coletadas com o auxílio de um veículo amostrador, foram analisadas quanto aos atributos físicos e químicos. A fim de acompanhar as possíveis mudanças em

relação à fertilidade do solo e sua compactação, uma nova amostragem foi realizada em 2004. Escolheu-se uma amostragem sistemática regular com espaçamento de 100 x 100 metros, perfazendo-se um total de 47 pontos de coleta no talhão de 42 ha. Essa nova grade de amostragem foi baseada nos resultados da análise geoestatística da amostragem anterior que previam um alcance de dependência espacial superior a 100 m.

Os resultados analíticos da primeira amostragem foram correlacionados com a produtividade da cana-de-açúcar obtida pela pesagem dos transbordos em campo. Os dados da segunda amostragem foram relacionados ao mapa de produtividade obtido pelo SIMPROCANA e serviram de base para recomendação de insumos em taxas variáveis.

Os resultados das análises da granulometria, macro e micronutrientes, acidez e resistência à penetração do solo, usados para a construção dos modelos ajustados aos semivariogramas, se adaptaram melhor às amostras coletadas na malha de 50 x 50m do que à de 100 x 100m. Embora baseado nos alcances máximos obtidos pela análise geoestatística da primeira amostragem, essa segunda malha não se mostrou adequada devido, principalmente, ao efeito pepita puro, encontrado para a maioria dos atributos.

Com base na avaliação das duas malhas utilizadas, conclui-se que é preciso que mais pesquisas sejam realizadas para se encontrar métodos mais adequados que representem a variabilidade espacial do terreno e que ao mesmo tempo sejam economicamente viável. É bem provável que esse método esteja relacionado com técnicas de sensoriamento que não precisem da remoção das amostras no campo e análise laboratoriais. Sensores que utilizam NIR (infravermelho próximo), LASER e condutividade elétrica entre outros, já estão em uso ou ainda em fase de desenvolvimento (REEVES e McCARTY, 2001; CHANG e LAIRD, 2002; KIM et al., 2004).

8.2 Instrumentação de colhedora para fins de mapeamento do rendimento da cultura

A Figura 71 representa a seqüência de atividades realizadas para a instrumentação da colhedora.

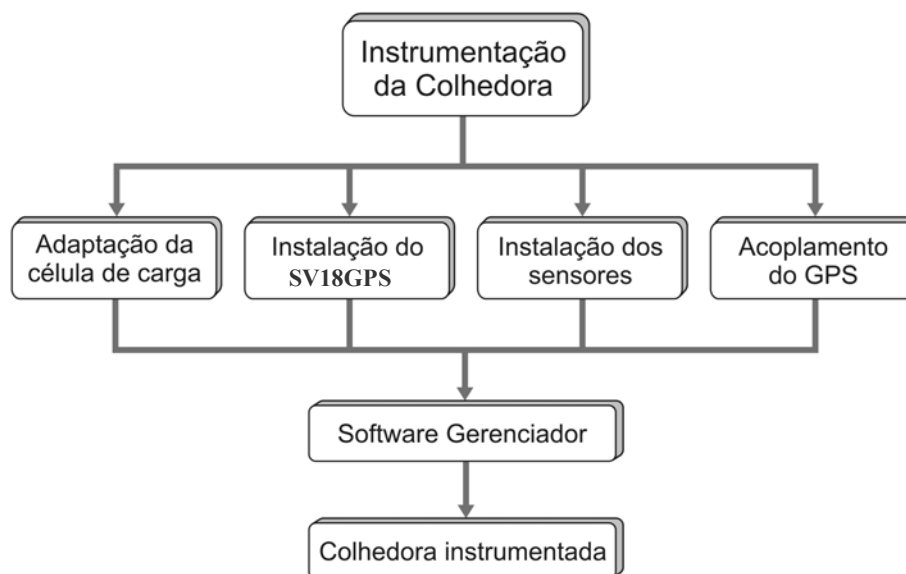


Figura 71. Diagrama em blocos das atividades realizadas para a instrumentação da colhedora.

Esse esquema mostra que para adaptar a colhedora para o mapeamento da produtividade de cana-de-açúcar, técnicas nas áreas de eletrônica, mecânica e informática foram necessárias. Com o auxílio de células de carga construiu-se uma balança a qual foi adaptada ao elevador da colhedora. Essa balança é capaz de pesar o fluxo de rebolos da cana que passa por ela antes de serem lançados ao transbordo. Sensores magnéticos e acelerômetros foram instalados para possibilitar a correção do peso e auxiliar no gerenciamento do sistema. Para gerenciar esse sistema foi desenvolvido um programa em linguagem C. Esse programa foi elaborado de forma a gerar base de dados que representa a superfície de produção da cultura.

A integração do programa com a eletrônica embarcada funcionou de forma esperada e foi capaz de gerar, com auxílio de um SIG, o mapa de produtividade da cultura.

O emprego de dois métodos de comparação para avaliar a acurácia do SIMPROCANA apresentou resultados discrepantes, conforme descritos a seguir. Comparando-se o **peso real** considerado como aqueles provenientes da pesagem de cada caminhão e **peso calculado** como aquele calculado pelo sistema desenvolvido, pôde-se observar que o erro médio obtido foi de 0,96 % e que o erro máximo encontrado foi de 6,4 %, indicando boa acurácia do monitor de produtividade de cana-de-açúcar desenvolvido. Porém, se adotarmos o **peso real** como aquele proveniente da pesagem de cada um dos 268 transbordos e **peso calculado**, obtido pelo sistema desenvolvido, pode-se verificar que a média dos erros foi de 9% com coeficiente de variação de 20%. Esses erros elevados, indicam que é aconselhável o aprimoramento do sistema até se obter erros de medidas abaixo de 5%. No entanto, o fato de o tamanho das plataformas de pesagem serem menores que a largura dos pneus dos transbordos e as dificuldades de posicionamento destes no centro de cada plataforma, podem ser provavelmente, a principal fonte desse erro encontrado. Essas observações podem ser em parte comprovadas pelas diferenças entre os pesos obtidos na balança da usina, no sistema desenvolvido e nas plataformas de pesagem.

A pesagem do transbordo em campo apresentou valores médios maiores que os calculados pelo SIMPROCANA e pela balança da usina. A comparação desses dois últimos pesos evidenciam erros em torno de 0,9% o que gerou dúvida sobre a confiabilidade das plataformas de pesagem, como método para verificar a acurácia do sistema desenvolvido. Uma opção para melhorar a avaliação da eficiência do SIMPROCANA seria alimentar a máquina em posição estacionada com feixes de cana de peso conhecido e verificar se houve diferença de pesagem indicada pelo sistema. Outra opção seria a pesagem de uma porção representativa da carga colhida em tanque estacionário e equipado com células de carga ou ainda, a utilização de plataformas de pesagem maiores.

O maior problema do sistema residiu na durabilidade das células de carga e da fixação da balança no elevador da colhedora. Devido à forma com que as células de carga foram fixadas à balança, elas se mostraram muito sensíveis a choques decorrentes das manobras da colhedora e a esforços provocados por fragmentos de cana presos entre a talisca e o fundo do elevador da máquina.

A partir das dificuldades apresentadas, é provável que soluções como a substituição de duas células de carga por uma, e a utilização de batentes sob as células para evitar os esforços acima do seu fundo de escala sejam suficientes para redução de tais problemas. A nova balança proposta seria composta por prato retangular de pesagem, apoiado em cada uma das quatro extremidades por uma mola, as quais estariam fixas a uma estrutura apoiada em uma célula de carga presa a uma base de sustentação de todo o sistema. As molas teriam como função a absorção de possíveis impactos. Abaixo da célula de carga, a inclusão de um parafuso regulável com a função de batente, poderia evitar que forças acima da esperada, provocassem uma deformação permanente da célula, o que levaria a sua inutilização.

8.3 Mapeamento do rendimento da cultura da cana-de-açúcar

A Figura 72 representa a seqüência de atividades realizadas para a geração do mapa de produtividade da cultura.

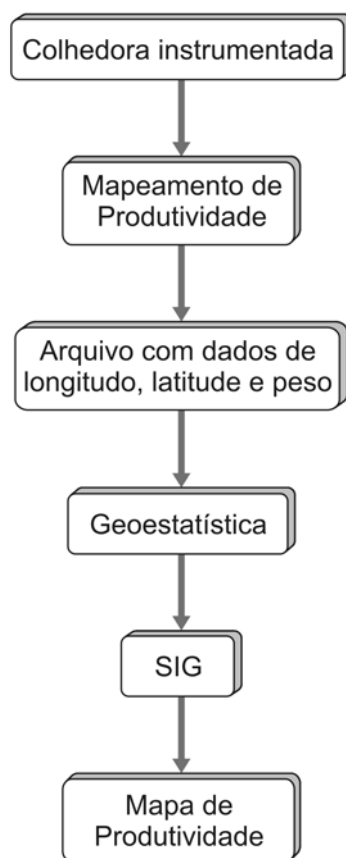


Figura 72. Diagrama em blocos das atividades realizadas para o mapeamento da produtividade.

Utilizando a colhedora instrumentada descrita no capítulo 6, gerou-se base de dados contendo informações sobre latitude, longitude, peso, velocidade da colhedora, ângulo do elevador, área colhida e produtividade. Essa base em formato TXT foi transferida para o SIG ArcGis 8.3, onde, com auxílio do sub-programa Geostatistical Analyst, foi interpolado para geração de mapas de produtividade.

Os resultados provenientes da base de dados foram interpolados pelos métodos do Peso do Inverso da Distância (IDW) e da Krigagem. Considerando o grande número de dados gerados no processo de mapeamento o método do IDW foi capaz de representar a variabilidade espacial da cultura de forma mais rápida e mais simples, porém, apresentou erro de interpolação mais elevado quando comparado com a Krigagem. Portanto, a escolha de um ou outro método está na dependência das exigências do usuário. Nesta pesquisa adotou-se como critério o método da krigagem devido ao fato de apresentar menor erro de interpolação.

8.4 Avaliação da produtividade através das correlações dos atributos do solo com o rendimento da cultura

Uma vez concluída a execução das três fases anteriores procedeu-se as interligações visando o objetivo principal da pesquisa que é a correlação da produtividade da cana-de-açúcar com aos atributos físicos e químicos do solo. A Figura 73 representa um esquema simplificado utilizado para interligar essas três fases.

O procedimento de avaliação das prováveis causas da variação da produtividade da cana-de-açúcar adotado nesta pesquisa, baseia-se na correlação dos atributos físicos e químicos do solo com o rendimento da cultura, obtido com o auxílio da colhedora instrumentada e a partir da pesagem dos transbordos em campo.

Para efetuar essa correlação, inicialmente foi atribuído a cada local de amostragem de solo, um valor médio de produtividade em raio de 25m. Em seguida, utilizou-se o índice de correlação linear para a geração de uma matriz de correlação. Esse procedimento foi adotado para as três primeiras camadas do solo. Essa matriz relaciona todos os atributos, individualmente, à produtividade. Os resultados obtidos indicam que essas correlações são constituídas de valores baixos ($< 0,5$). Esses baixos valores também foram encontrados por

diversos autores, porém, para outras culturas (VIANA da MATA et al., 1999; YANAI et al., 2001; VIEIRA & MOLIN, 2001; MOLIN et al., 2001).

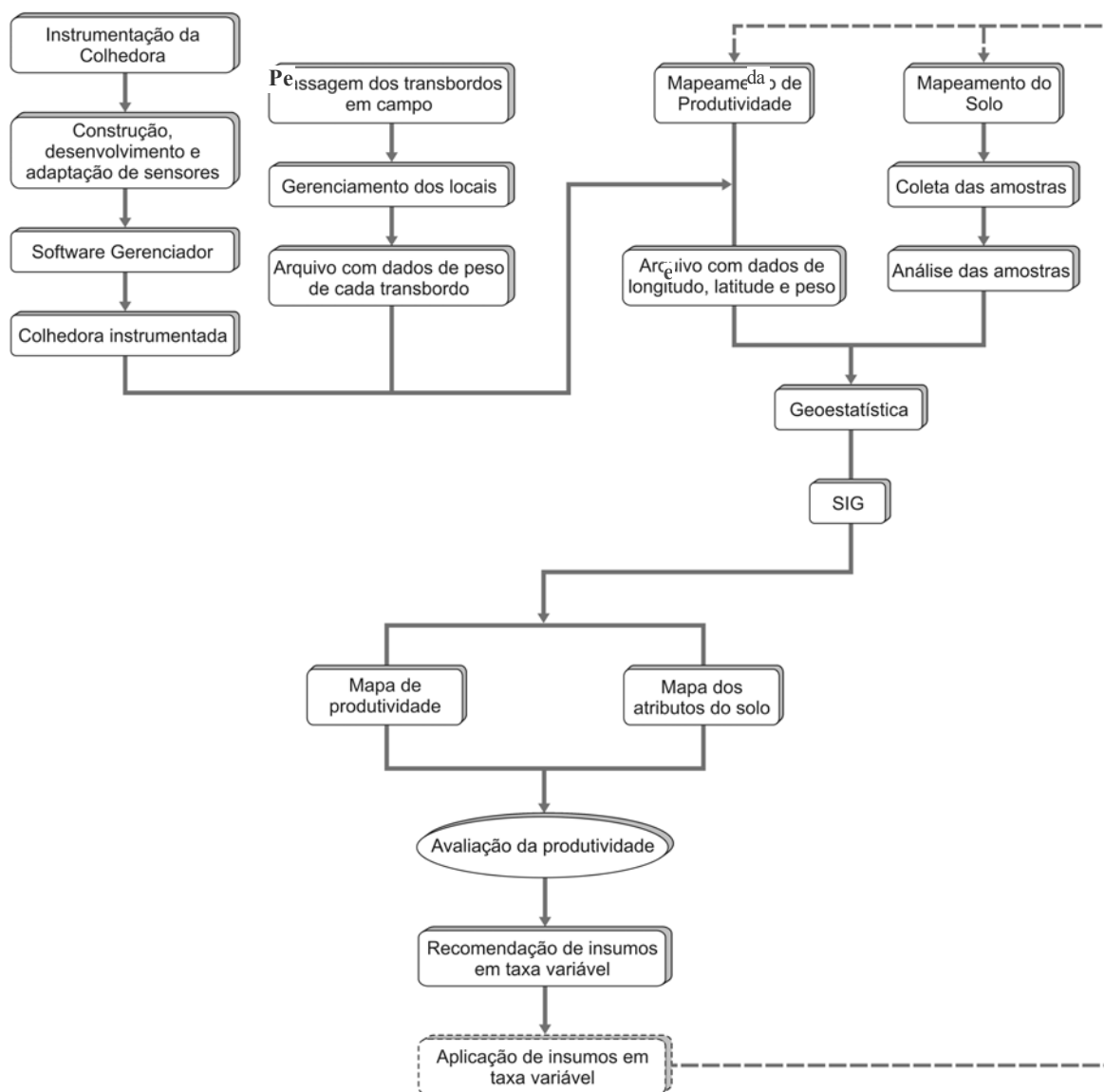


Figura 73. Esquema mostrando a interligação varias atividades realizadas na pesquisa.

Para explicar a variabilidade da produtividade da cultura, outras informações como drenagem e umidade do solo, plantas invasoras, pragas e doenças, entre outras, devem ser

obtidas e incorporadas na avaliação. Outro fator que poderia ser utilizado para explicar tais valores foi o índice de correlação linear, por ser um método simples, que relaciona as características uma a uma. Métodos mais avançados como análise multivariada, índice Kapa, redes neurais, entre outros, poderiam resultar em melhores correlações e portanto, devem ser avaliados em futuras pesquisas.

Embora os valores dos atributos do solo não tenham sido suficientes para explicar a diferença de produtividade, foram utilizados como base para simulações de aplicação de fertilizantes e corretivos em taxa variada.

Seis simulações envolvendo adubações fosfatadas, potássica e calagem com taxas fixas e variadas foram efetuadas para se avaliar o rendimento econômico desses dois modos de aplicação.

A aplicação de fósforo em taxa variável foi a que apresentou significativa redução de dosagem recomendada, com aproximadamente dois terço da aplicação feita pela média. Em áreas semelhantes a esta pesquisa, a aplicação desse fertilizante de forma localizada traria à usina economia de R\$55,00 ha⁻¹, além de reduzir a possibilidade de contaminação do lençol freático. Com relação ao potássio a economia seria de R\$17,00 ha⁻¹ e não haveria diferenças significativas de custo devido à aplicação de calcário. Embora não haja diferença de custos na aplicação de calcário nas duas maneiras de aplicação, a taxa fixa pode estar comprometendo a produtividade da cultura. A correção inadequada da acidez do solo tanto pelo excesso como pela falta do calcário, traz como consequência, a imobilização de certos micronutrientes, do fósforo e colocando o alumínio na forma disponível e portanto fitotóxica.

Além dessas desigualdades a redução do consumo desses insumos gera uma redução do uso de horas-máquina, uma vez que não há a necessidade de trafegar com os equipamentos onde não há aplicação a ser feita, como no caso do fósforo. No entanto, essa abordagem não foi adotada nesta pesquisa.

O ciclo da Agricultura de Precisão aplicado a determinada cultura envolve os mapeamentos da produtividade e dos fatores agronômicos de produção. Passa por processo de análise dessas informações com a finalidade de recomendar uma aplicação em taxa variada de insumos. Novo ciclo é reiniciado com a fase de mapeamentos, os quais tem a finalidade de avaliar as tomadas de decisão anteriormente adotadas e servir de base para o início desse novo

ciclo. Nesta pesquisa, praticamente todo o ciclo foi contemplado, com a exceção da aplicação de insumos em taxa variada.

9. CONCLUSÕES GERAIS

O monitor de produtividade desenvolvido (SIMPROCANA) possibilitou a identificação da variabilidade espacial da cultura de cana-de-açúcar em uma área de 42ha. A montagem e as adaptações efetuadas ocorreram de forma simples e rápida, permitindo a fácil reprodução deste sistema em qualquer outra colhedora que possua o mesmo tipo de mecanismo de transporte de cana-de-açúcar para o transbordo.

O sistema está funcionando de acordo com o proposto. O protótipo desenvolvido é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo, com um erro máximo de 6,4%. Esse erro é gerado quando se compara o peso indicado por esse sistema com o da carga de cana obtida na balança da usina. O erro médio dos dados de produtividade aumenta para 9% quando se compara o peso obtido pelo SIMPROCANA com aquele proveniente do transbordo pesado no campo.

O uso das balanças de campo para pesagens dos transbordos como verificação da acurácia do sistema desenvolvido precisa ser mais bem avaliado, pois essas balanças também podem apresentar erros.

A presente pesquisa mostrou que apesar do aparente aspecto homogêneo da área de estudo, foi possível verificar a existência de uma importante variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo. Também revelou que para essa área, tais atributos são mais bem representados quando as amostras georeferenciadas são coletadas em grade de 50 x 50m

A associação das informações dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade obtida pelo SIMPROCANA mostraram-se insuficientes para explicar as áreas com diferentes valores de produção. As correlações apresentaram baixos valores, menor que 0,5. Essa conclusão contraria a hipótese formulada nesta pesquisa a qual considera que a produtividade da cultura da cana-de-açúcar está relacionada com os atributos físicos e químicos do solo.

Apesar das baixas correlações, foi possível recomendar aplicação de calcário, fósforo e potássio em taxas variáveis, as quais apresentaram um ganho de aproximadamente R\$3.000,00 na área total ou R\$72,00 por hectare.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGCO. Fieldstar: the science of agriculture. Disponível em: www.fieldstar.dk. Acesso em: 20 ago.1998.

AGRIANUAL. Anuário de agricultura brasileira. 10. ed. 2005. 520p.

BALASTREIRE, L.A. **Agricultura de precisão**. Piracicaba: O Autor, 1998a. 72p.

BALASTREIRE, L.A. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, n.4, p.22-26, 1998b.

BARBIERI, D.M. ; SOUZA, Z.M. ; MARQUES JÚNIOR, J.; CORÁ, J. E. ; PEREIRA, G. T. ; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de fósforo, potássio e soma de bases em um latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar na região de Jaboticabal, SP. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25.; IX REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 9.; VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 4., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 2002. p. 28.

BENJAMIN, C.E. **Sugar cane yield monitoring system**. 62 p. Dissertation (M.S. of Science in Biological and Agricultural Engineering) - Department of Biological and Agricultural Engineering, Louisiana State University, Louisiana. 2002.

BLACKMER, T.; SCHEPERS, J.S. Using DGPS to improve corn production and water quality. **GPS World**, Duluth, p.44-52, 1996.

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

BLACKMORE, B.S.; MARSHALL, C.J. Yield Mapping; errors and algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings...** p.403-415.

BERNOUX, M.M.Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; BOURENNANE, H. Modeling vertical distribution of carbon in Oxisols of the western Brazilian Amazon. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.941-951, 1998b.

BORGELT, S.C.; SUDDUTH, K.A. **Grain flow monitoring for in-field mapping**. St. Joseph: ASAE, 1992. (ASAE Paper, 921022).

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.A.; MULLA, D.J. Spatially variable liming rates: a method for determination. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, p.1499-1507, 1994.

BOUMA, J. Precision agriculture: a unique tool to unify production and environmental requirements in agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 4., Minnesota, 1998. **Proceedings...** Minnesota: ASA; CSSA; SSSA, 1998. v.1, p.595-601.

BOURENNANE, H.; SALVADOR-BLANES, S.; CORNU, S.; KING, D. Scale of spatial dependence between chemical properties of topsoil and subsoil over a geologically contrasted area (Massif central, France). **Geoderma**, v.112, n.3-4, p.235-251, 2003.

BOURGAULT, G.; JOURNAL, A.G.; RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Geostatistical analysis of a soil salinity data set. **Advances in Agronomy**, New York, v.58, p.241-292, 1997.

BRAGATO, G.; PRIMAVERA, F.. Manuring and soil type influence on spatial variation of soil organic matter properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, p. 1313-1319, 1998.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 3 mar. 2005.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block Kriging. **Journal of Soil Science**, v.31, p.333-341, 1980.

BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. **Soil and Fertilizers**, Harpenden, v.56, p.529-562, 1993.

CASE IH AGRICULTURE EQUIPMENT. Advanced farming systems. Disponível em: www.casecorp.com/agricultural/afs/index.html. Acesso em: 10 jan.1999.

CASTRIGNANO, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R.; MARTINELLI, N.. Study of spatial relationships among soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n. 1/2, p.39-60, 2000.

CERRI, D.G.P.; BALASTREIRE, L.A. Development of variable rate lime application system. In: WORLD CONGRESS OF COMPUTERS IN AGRICULTURE AND NATURAL RESOURCES, 2002, Foz do Iguaçu. St. Joseph: ASAE, 2002. p. 238-243.

CERRI, D.G.P; MAGALHÃES, P.S.G. Applying sugar cane precision agriculture in Brazil. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2003, Las Vegas. St. Joseph: ASAE, 2003. (ASAE Technical Paper Series n. 031041).

CHANG, C.W.; LAIRD, D.A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. **Soil Sci.**, 167 (2002) 110-116.

CHEVALLIER, T.; VOLTZ, M.; BLANCHART, E.; CHOTTE, J.L.; ESCHENBRENNER, V.; MAHIEU, M.; ALBRECHT, A.. Spatial and temporal changes in soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol (Martinique). **Geoderma**, Amsterdam, v.94, n.1, p.43-58, 2000.

CLARK, R.L.; MCGUCKIN, R.L. Variable rate application technology: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1996. p.855-862.

COX, G.; HARRIS, H.; PAX, R. Development and testing of a prototype yield mapping system. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 19., 1997, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1997. p. 38-43.

COX, G.; HARRIS, H.; PAX, R.; DICK, R. Monitoring cane yield by measuring mass flow through the harvester. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONFERENCE, 18., 1996, Mackay. **Proceedings...** Brisbane: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1996. p.35-42.

CRESSIE, N. When are relative variograms useful in geostatistics? **Mathematical Geology**, New York, v.17, n.7, p.693-701, 1985.

DEGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J.. Model based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., 2000, Caxambu. Publicação

especial, 2000, 129p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. **Manual de método de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1979. 1 v.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

FAO. **Agricultural production**. Disponível em: <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>. Acesso em: 02 mar. 2005.

FREITAS, J.G.; MOLIN, J.P.; DE ARAUJO, J.C.; DE MARIA, I.C.; CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P. Espacialização de fatores e componentes de produção de soja (*Glycine max* L.) em agricultura de precisão. In: SIMPOSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2001, Piracicaba. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. 2002. p. 115-121.

FROGBROOK, Z.L.; OLIVER, M.A.; SALAHI, M.; ELLIS, R.H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, v.18, p.1-9, 2002.

GASTON, L.A.; LOCKE, M.A.; ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Spatial variability of soil properties and weed population in the Mississippi delta. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.449-459, 2001.

GOERING, C.E. Recycling a concept. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.74, p.25, 1993.

GOERING, C.E.; HANS, S. A field information system for SSCM. In: INTERNATIONAL OFF-HIGHWAY & POWERPLANT CONGRESS & EXPOSITION, 1993, Milwaukee. Warrendale: SAE, 1993. (SAE Technical Paper Series n. 932422).

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação**. 1997. 118 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, A.C.A; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n.1, p.155-164, 1999.

GOOVAERTS, P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.27, p.315-334, 1998.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v.89, n.1/2, p.1-45, 1999.

HAN, S.; HUMMEL, J.W.; GOERING, C.E.; CAHN, M.D. Cell size selection for site specific crop management. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.1, p.19-26, Jan./Feb. 1994 .

IEMMA, A.F. Estatística descritiva. 1.ed. Piracicaba: φσφ Publicações, 1992. 182p.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996. 285p.

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

JOHN DEERE. **Precision farming**. Disponível em: www.deere.com/greenstar. Acesso em: 12 ago. 1998.

JOHNSON, R.C., Target farming: A practical guide to precision farming concepts and technology. 1996.

JOURNEL, A.G.; ROSSI, M.E. When do you need a trend model in kriging? **Mathematical Geology**, New York, v.21, n.7, p.715-739, 1989.

KIM, H.; HUMMEL, J.W.; BIRRELL, S.J. Evaluation of ion-selective membranes for real-time soil macronutrients sensing. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2004, Ottawa, Canada. St. Joseph: ASAE, 2004. (ASAE Technical Paper Series n. 041044).

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; MOLINA, J.A.E.; STEWART, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.37-51.

LÜTTICKEN, R.; KOCH, W.; BILL, R. The potential of yield maps and soil survey data in low cost site specific farming strategies. In: **Precision agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1997. p. 803-810.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A.; CERRI, D. G. P. Automação de amostragem: novas tecnologias e equipamentos para avaliação das propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 2003, Ribeirão Preto. 2003. v. 1, p. 1-8.

MANZIONE, R.L.; RODRIGUES, J.B.T.; ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial multivariada na avaliação de parâmetros químicos do solo. In: SIMPOSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2001, Piracicaba. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba: ESALQ, 2002. p. 23-31.

MAPA, R.B.; KUMARAGAMAGE, D. Variability of soil properties in a tropical alfisol used for shifting cultivation. **Soil Technology**, Amsterdam, v.9, p.187-197, 1996.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. 1971. (Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fointanebleau, 5).

McBRATNEY, A.B.; PRINGLE, M.J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, Guilford, v.1, p.125-152, 1999.

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

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O Autor, 2001. 83p

MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M. Use of GPS without differential correction on yield mapping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: ASA; CSSA; SSSA, 2002. p. 1073-1079.

MOLIN, J.P.; FRANCO, F.N.; PINCELLI, A.L.S.; SUGUISAWA, J.M.; SILVA, S.S.S. Avaliação da regularidade do peso das cargas de carregadoras mecânicas de cana-de-açúcar em corte manual com queima prévia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

MOLIN, J.P.; COUTO, H.T.Z.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; VIEIRA, S.R. Regression and correlation analysis of grid soil data versus cell spatial data. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001b, Montpellier. Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 449-453.

MOLIN, J.P.; RIBEIRO FILHO, A.C.; TORRES, F.P.; SHIRAISSI, L.E.; SARTORI, S.; SARRIÉS, G.A. Mapeamento da produtividade de café e sua correlação com componentes da fertilidade do solo em duas áreas piloto. In: SIMPOSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2001, Piracicaba. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001.** Piracicaba: ESALQ, 2002. p. 58-65.

MORGAN, M.; ESS, D. **The precision-farming for agriculturists.** 2.ed. Illinois: John Deere, 2003. 117 p.

OLIVEIRA, J.B. **Levantamento pedológico do Estado de São Paulo:** quadrícula de Araras. Campinas: Instituto Agrônômico, 1982. 180 p. (Boletim Técnico, 71).

OLIVIER, M.A.; WEBSTER, R. How geostatistics can help you. **Soil Use and Management**, v.7, n.4, p.206-217, 1991.

OSTERGAARD, H.S. Agronomic consequences of variable fertilization. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE '97, 1., 1997, Oxford. **Proceedings...** London: BIOS Scientific Publications, 1997. v.1, p. 315-320.

PAGNANO, N.B. **Sistema de medição de fluxo de cana-de-açúcar em colhedoras para a geração de mapas de produtividade.** 88p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

PAGNANO, N.B.; MAGALHÃES, P.S.G. Sugar cane yield measurement In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. v. 2, p. 839-843.

PIEROSI, M.A.; HASSUANI, S.J. Caçamba instrumentada para pesagem de cana picada. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: Copersucar, 1997. p. 263-265.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RAWLINS, S. Moving from precision to prescription farming: the next plateau. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 3., Minneapolis, 1996. **Proceedings...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1996. p. 283-294.

REEVES, J.B.; McCARTY, G.W. Quantitative analysis of agricultural soils using near infrared reflectance spectroscopy and a fibre-optic probe. *J. Near Infrared Spectrosc.* 9 (2001) 25-34.

RIBEIRO JUNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** 1995. 99p. (Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

ROBERTSON, G.P.; KLINGENSMITH, K.M.; KLUG, M.J.; PAUL, E.A.; CRUM, J.R.; ELLIS, B.G. Soil resources, microbial activity, and primary production across an agricultural ecosystem. **Ecological Application**, v.7, n.1, p.158-170, 1997.

SARAIVA, A.M.; SANTANA, J.L.; HIRAKAWA, A.R.; CUGNASCA, C.E.; PIEROSI, M.A.; HASSUANI, S.J. Yield mapping of sugar cane: dynamic weighing on grab loaders. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE ODENSE CONGRESS, 2., 1999, Denmark. p. 11-15.

SCHUELLER, J.K. A review and integrating analysis of spatially-variable crop control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v.33, p.1-34, 1992.

SEARCY, S.W. Engineering systems for site-specific management: opportunities and limitations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1994, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1995. p. 44.

SILVA, R.B.; MIRANDA, E.E.V.; LANÇAS, K.P.; COSTA, E.M. Influência da resistência mecânica do solo na produtividade de cana-de-açúcar, avaliada através da pressão de preconsolidação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

SLOT, M.H.; GENTHNER, M.H.; DANIELS, W.L.; GROOVER, V.A. Spatial variability in Palustrine wetlands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.527-535, 2001.

STAR, J.; ESTES, J. **Geographic information system: an introduction**. New Jersey: Prentice Hall, 1990. 303p.

STRAUSS, C.; CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M.; PAZ, S.M. The ISO11783 standard and its use in precision agriculture equipment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, 4., 1998, Minnesota, **Proceedings...** Minnesota: ASA; CSSA; SSSA, 1998. v.2, p.1253-1261.

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

TUKEY, J.W. **Exploratory data analysis**. Reading: Adsson-Wesley, 1977. 3v.

VIANA da MATA, J.D.; GONÇALVES, A.C.A; VIEIRA, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Relação entre produtividade e resistência à penetração em área irrigada por pivô central, sob dois sistemas de preparo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.21, n.3, p.519-525, 1999.

VIEIRA, S.R. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. 61p. (Curso de atualização em conservação do solo).

VIEIRA S.R.; MOLIN J.P. Spatial variability of soil fertility for precision agriculture. In: THIRD EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2001, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. v. 1, n., p. 491-496.

WEBSTER, R.. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.3/4, p.149-163, 2000.

WEBSTER, R.. Statistics to support soil research and their presentation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.52, p.331-340, 2001.

WENDTE, K.W.; SKOTNIKOV A.; THOMAS K.K. **Sugar cane yield monitor**. United States Patent No. 6272819. August 14, 2001.

WHITE, J.G.; WELCH, R.M.; NORVELL, W.A.. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.185-194, 1997.

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

YANG, J.I.; MOSBY, D.E.; CASTEEL, S.W.; BLANCHARD, R.W. Microscale pH variability for assessing of phosphoric acid treatment in lead-contaminated soil. **Soil Science**, Baltimore, v.66, n.6, p.374-381, 2001.