

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

**INFLUÊNCIA DO MANEJO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOBRE A
EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO IRRIGADO.**

GERSON ARAUJO DE MEDEIROS

Tese de Doutorado apresentada à FEAGRI/UNICAMP como cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Água e Solo.

Campinas – SP
fevereiro de 2002

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

**INFLUÊNCIA DO MANEJO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOBRE A
EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO IRRIGADO.**

GERSON ARAUJO DE MEDEIROS

**Orientador:
Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL**

**Co-orientador:
Prof. Dr. EDSON EIJI MATSURA**

Tese de Doutorado apresentada à FEAGRI/UNICAMP como cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Água e Solo.

Campinas,
fevereiro de 2002

Aos meus pais Gustavo Medeiros e Lais Araujo de Medeiros,
Que sempre estiveram a meu lado, apoiando meus sonhos e
ideais, meu reconhecimento e gratidão.

A minha companheira Gisela e aos
meus filhos Juan Lucas e Marina, os
grandes amores de minha vida,
dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Luiz Antonio Daniel, pelos ensinamentos transmitidos e orientação;
- Aos professores Hilton Silveira Pinto, Ednaldo Carvalho Guimarães e Antonio Carlos de Souza Maia pelas contribuições relevantes a este trabalho;
- Ao pesquisador Dr. Flavio Bussmeyer Arruda, do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônômico, pelas sugestões e o apoio irrestrito;
- Ao Curso de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela possibilidade da realização do curso;
- Ao Departamento de Água e Solo da Feagri/UNICAMP, em especial ao professor Denis Miguel Roston, pelo apoio irrestrito e pela liberação concedida para a realização dos trabalhos de campo;
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro a este trabalho;
- Ao Fundo de Apoio ao Ensino e Pesquisa da UNICAMP (FAEP) pelo apoio financeiro a este trabalho;
- Ao Centro de Pesquisa e Ensino na Agricultura em especial aos pesquisadores Dr. Jurandir Zullo Junior e Dr. Giampaolo Pellegrino Queiroz pelo apoio irrestrito ao trabalho seja pela assessoria técnica como por disponibilizar as informações meteorológicas e equipamentos necessários;

- Ao Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agronômico, em especial ao pesquisador Dr. Emílio Sakai por disponibilizar as instalações e pessoal técnico para determinações deste trabalho;
- Ao Centro de Solos e Recursos Agroambientais do Instituto Agronômico, em especial aos pesquisadores Dr. Sidnei Rosa Vieira e Dra. Sonia C. F. Dechen, por disponibilizar equipamentos e pelas sugestões e apoio dados a este trabalho;
- Ao Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em especial ao professor Carlos Roberto Espíndola, à técnica Célia Panzarin Gonçalves e ao Eng. José Ricardo de Freitas Lucarelli pelo apoio irrestrito, sugestões e amizade antes, durante e após os ensaios;
- Ao Laboratório de Protótipos da Feagri/UNICAMP, em especial ao professor Paulo Sergio Graziano Magalhães, e aos funcionários Roberto, José Maria, Luiz e Francisco pelo apoio irrestrito, sugestões e amizade;
- Ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Feagri/UNICAMP, em especial aos professores Roberto Teztezla e Edson Eiji Matsura, e ao Eng. Túlio Assunção Pires Ribeiro, e ao funcionário Gelson Espíndola pelo apoio irrestrito, sugestões e amizade;
- Ao Campo Experimental da Feagri/UNICAMP, em especial aos funcionários Jurandir, José Budia, Freire, Joaquim, Deividi e Osvaldo pelo apoio dado a este trabalho;
- A pesquisadora Dra. Regina Célia Matos Pires, do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agronômico, pelas orientações sobre a condução do trabalho;
- Aos professores Marco Antonio Galli e André Luiz Paradela, do Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal, pelas sugestões e diagnósticos durante a condução do trabalho;

- Aos engenheiros Marcelo Bonarotti Bomfim, Marcelo dos Santos Corazza, Carlos Henrique Cruz Pelacani e Danilo Ribeiro, pelo apoio e sugestões dados durante este trabalho;
- À engenheira Cristiane Colleti pelas sugestões apresentadas durante o ensaio;
- A engenheira Silvana Marghato pelas sugestões apresentadas durante o ensaio;
- A professora Lilia Maria Rosamiglia Marques do CREUPI pelo apoio e amizade;
- A pesquisadora Dra. Emília Hamada da EMBRAPA, pelo apoio e amizade;
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução.....	1
2. Revisão de Literatura.....	3
3. Material e Métodos.....	16
3.1. Local do experimento e seu histórico.....	16
3.2. Cultura.....	19
3.3. Condições climáticas durante o ensaio.....	19
3.4. Solo.....	22
3.4.1. Levantamentos de fertilidade.....	22
3.4.2. Levantamento dos parâmetros físico-hídricos do solo.....	23
3.4.3. Curva de retenção, porosidade total, macro e microporosidade, lâmina total de água disponível.....	27
3.5. Instalação e desenvolvimento do ensaio.....	29
3.5.1. Bioensaio para avaliação de fitotoxicidade nas plantas do feijoeiro.....	31
3.6. Sistema e manejo de irrigação.....	32
3.7. Balanço hídrico de campo.....	33
3.7.1. Armazenamento da água no solo.....	33
3.7.2. Drenagem Profunda.....	34
3.7.3. Evapotranspiração.....	35
3.8. Condições hídricas da planta.....	36
3.9. Parâmetros de desenvolvimento da planta.....	37
3.10. Sistema radicular da cultura.....	38
3.11. Produção final.....	38
3.12. Metodologia estatística para análise de dados.....	39
3.12.1. Variáveis analisadas estatisticamente.....	39
3.12.1.1. Propriedades físico-hídricas para os quatro sistemas de preparo do solo.....	39
3.12.1.2. Desenvolvimento da cultura, produção e suas componentes.....	40
3.12.2. Estatísticas descritivas e teste de normalidade das variáveis.....	40

	Página
3.12.3. Comparações entre médias para os sistemas de preparo do solo	41
4. Resultados e Discussão	44
4.1. Manejo de irrigação, tensão de água no solo e condições hídricas da planta.....	44
4.2. Propriedades físico-hídricas do solo.....	54
4.2.1. Avaliação da variabilidade, distribuição dos dados e comparação de médias.	54
4.2.1.1. Granulometria, densidade do solo e de partículas, porosidade total.....	55
4.2.1.2. Curva de retenção de água no solo, qualidade dos poros e disponibilidade total de água no solo.....	71
4.2.1.3. Condutividade hidráulica saturada e infiltração básica.....	76
4.2.1.4. Resistência do solo à penetração e crescimento radicular.....	83
4.3. Desenvolvimento da cultura.....	105
4.3.1. Altura da planta.....	105
4.3.2. Porcentagem de cobertura vegetal.....	112
4.3.3. Índice de área foliar.....	113
4.3.4. Fitomassa e número de trifólios.....	118
4.4. Produção.....	123
4.5. Balanço hídrico de campo.....	127
4.5.1. Umidade do solo.....	127
4.5.2. Balanço hídrico.....	130
4.6. Considerações finais.....	136
5. Conclusões	141
6. Referências Bibliográficas	143

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Vista aérea das parcelas experimentais, destacando-se os seguintes sistemas: T1, convencional com grade aradora; T2, alternado de equipamentos; T3, reduzido com escarificador; T4, plantio direto; T5, convencional com arado de disco; T6, talhão roçado; T7, talhão mobilizado “morro abaixo”; T8, enxada rotativa.....	17
Figura 2. Parâmetros climáticos verificados durante o ensaio do feijoeiro irrigado: temperatura máxima (Temp.Máxima) e mínima (Temp.Mínima), evapotranspiração de referência (ET _o) pelo método de Penman-Monteith modificado pela FAO (Allen et al., 1998), e precipitação, em Campinas - SP, no período de 8 de setembro a 6 de dezembro de 1999.....	20
Figura 3. Esquema de amostragem para a determinação da textura, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, condutividade hidráulica saturada, infiltração básica e resistência do solo à penetração.....	24
Figura 4. Veículo amostrador de solos utilizado para a coleta de amostras indeformadas do solo e descrito em Texeira (1998).....	28
Figura 5. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo alternado, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	45
Figura 6. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo escarificador, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	46

	Página
Figura 7. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo convencional com arado de disco, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	47
Figura 8. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	48
Figura 9. Índice de estresse hídrico acumulado (IEHD) do feijoeiro irrigado, calculado com base na diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar, ao longo do ciclo, para os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	51
Figura 10. Índice de estresse hídrico acumulado (TSD) do feijoeiro irrigado, calculado com base na diferença entre a temperatura do dossel e de uma cultura bem irrigada, ao longo do ciclo, para os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	52
Figura 11. Gráfico “Box plot” dos valores da fração granulométrica para os sistemas de preparo do solo motomecanizados escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,20 m em Latossolo vermelho.....	57
Figura 12. Variação da densidade do solo em profundidade para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	60

	Página
Figura 13. Gráfico “Box plot” dos valores de densidade do solo para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,40 m, em incrementos de 0,10 m, para um Latossolo vermelho, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	61
Figura 14. Gráfico “Box plot” dos valores de densidade de partículas para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	66
Figura 15. Gráfico “Box plot” dos valores da porosidade total para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,20 m em Latossolo vermelho, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	69
Figura 16. Valores da curva de retenção de água no solo de um Latossolo vermelho submetido aos sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	72
Figura 17. Gráfico “Box plot” dos valores de condutividade hidráulica saturada e de infiltração básica para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0,15 m em Latossolo vermelho, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	78
Figura 18. Gráfico “Box plot” dos valores de umidade volumétrica para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados em Latossolo vermelho durante o ensaio de resistência a penetração em Campinas-SP, no ano de 1999.....	84

	Página
Figura 19. Variação da resistência do solo à penetração e umidade antes das operações de preparo, para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	87
Figura 20. Gráfico “Box plot” dos valores de resistência do solo à penetração para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados em Latossolo vermelho, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	88
Figura 21. Variação da resistência do solo à penetração e umidade, na época da colheita, para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	95
Figura 22. Distribuição do sistema radicular do feijoeiro no Latossolo vermelho submetido aos tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	99
Figura 23. Distribuição relativa do sistema radicular do feijoeiro no florescimento, nos sistemas de preparo do solo enxada rotativa, arado de disco, escarificador e alternado, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	102
Figura 24. Altura média de planta da cultura do feijoeiro submetida aos sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	106
Figura 25. Gráfico Box-Plot para a altura de planta do feijoeiro sob os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	107
Figura 26. Porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) da cultura do feijoeiro em diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	114

	Página
Figura 27. Índice de área foliar (IAF) da cultura do feijoeiro submetido aos sistemas de preparo do solo, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	115
Figura 28. Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	119
Figura 29. Evolução do número de trifólios da cultura do feijoeiro para os diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	122
Figura 30. Evolução da umidade no solo ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado para os sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa nas camadas de 0 a 0,10 m (A), 0,10 a 0,20 m (B) e 0,20 a 0,30 m (C), em Campinas - SP, no ano de 1999.....	128
Figura 31. Evolução da umidade no solo ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado para os sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa nas camadas de 0,30 a 0,40 m (A) e 0,40 a 0,50 m (B), em Campinas - SP, no ano de 1999.....	129
Figura 32. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo com escarificador, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	132
Figura 33. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo arado de disco, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	133

	Página
Figura 34. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	134
Figura 35. Variação da produção final com o índice de estresse hídrico acumulado (IEHD) para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	139

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Análise de fertilidade do Latossolo vermelho submetido aos tratamentos de sistema de preparo do solo, em Campinas-SP, no ano de 1999,.....	23
Tabela 2. Comparação entre médias da variável densidade do solo dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.....	62
Tabela 3. Comparação entre médias da variável densidade do solo nas profundidades avaliadas por sistema de preparo pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.....	63
Tabela 4. Comparação de médias para porosidade total na profundidade de 0 a 0,60 m e intervalo de confiança da média ao nível de 95%, para um Latossolo vermelho sob os sistemas de preparo do solo em Campinas – SP, no ano de 1999.....	74
Tabela 5. Médias de umidade volumétrica por profundidade e tratamento em Latossolo vermelho para os sistemas de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas.....	86
Tabela 6. Comparação entre médias da variável resistência do solo à penetração dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.....	91
Tabela 7. Comparação de médias de resistência do solo à penetração por profundidade para cada sistema de preparo do solo, pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 5%.....	92
Tabela 8. Comparação entre médias da variável umidade em base peso dos sistemas de preparo por profundidade em Latossolo vermelho na época da colheita.....	94

	Página
Tabela 9. Comparação entre médias da variável resistência do solo à penetração dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%, na época da colheita.....	96
Tabela 10. Médias de resistência do solo à penetração por profundidade para cada sistema de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 95%.....	97
Tabela 11. Comparação entre médias da densidade de raízes por profundidade para um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	101
Tabela 12. Comparação entre médias das variáveis de altura de planta do feijoeiro e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	109
Tabela 13. Médias de altura de planta por sistema de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 95%, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	110
Tabela 14. Equações de primeiro grau ($Y = A + BX$) relacionando acúmulo de matéria seca do feijoeiro (g m^{-2}) com o tempo (DAE) para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, durante a fase de crescimento linear de 31 a 65 DAE, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	120
Tabela 15. Matéria seca total da produção e de suas componentes, para os diferentes tratamentos de sistema de preparo do solo, em Campinas-SP, no ano de 1999.....	124
Tabela 16. Eficiência do uso da água da biomassa e da matéria seca de grãos do feijoeiro irrigado submetido aos sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.....	135

LISTA DE TABELAS DOS ANEXOS

	Página
Tabela 1A Estatísticas do Critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo para as variáveis de solo.....	158
Tabela 2A Resultados de textura de um Latossolo vermelho para os tratamentos de preparo do solo na profundidade de 0 a 0,20 m, em Campinas – SP, 1999.....	159
Tabela 3A Resultados de densidade do solo para os tratamentos de sistema de preparo escarificador, plantio direto, arado de disco e rotavação, em Campinas – SP, 1999.....	160
Tabela 4A Estatísticas do teste da Manova e teste exato de F para a densidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo..	161
Tabela 5A Análise de variância (ANOVA) para a densidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.....	161
Tabela 6A Resultados de densidade de partículas verificados para os tratamentos de preparo do solo escarificador, arado de disco e rotavação, na profundidade de 0 a 0,20 m, em Campinas – SP, 1999.....	161
Tabela 7A Resultados de porosidade total do solo observados para os sistemas de preparo escarificador, plantio direto, arado de disco e rotavação, na profundidade de 0 a 0,20 m, em Campinas – SP, no ano de 1999.....	162
Tabela 8A Parâmetros da regressão do modelo de Van Genutchen (1980) para os diferentes tratamentos de sistema de preparo do solo em Latossolo vermelho, em Campinas –SP, no ano de 1999.....	162
Tabela 9A Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a porosidade total em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.....	163

	Página
Tabela 10A	Análise de variância (ANOVA) para a porosidade total em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo..... 163
Tabela 11A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a macroporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo..... 163
Tabela 12A	Análise de variância (ANOVA) para a macroporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo..... 164
Tabela 13A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a microporosidade em diferentes profundidades por sistema de preparo do solo..... 164
Tabela 14A	Análise de variância (ANOVA) para a microporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo..... 164
Tabela 15A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a lâmina total de água disponível em diferentes profundidades por sistema de preparo do solo..... 165
Tabela 16A	Análise de variância (ANOVA) para a lâmina total de água disponível em diferentes profundidades por sistema de preparo do solo..... 165
Tabela 17A	Resultados de condutividade hidráulica saturada nos tratamentos de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, na profundidade de 0,15 m, em Campinas-SP, no ano de 1999..... 165
Tabela 18A	Resultados de infiltração para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, na profundidade de 0,15 m, em Campinas – SP, no ano de 1999..... 166
Tabela 19A	Resultados de umidade volumétrica em Latossolo vermelho durante a avaliação do atributo resistência do solo à penetração para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999..... 167

	Página
Tabela 20A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo do solo sobre a umidade volumétrica, antes das operações de preparo..... 168
Tabela 21A	Análise de variância (ANOVA) para a umidade volumétrica em diferentes profundidades por sistema de preparo do solo antes das operações de preparo..... 168
Tabela 22A	Resultados de resistência do solo à penetração em Latossolo vermelho para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999..... 169
Tabela 23A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, antes das operações de preparo..... 171
Tabela 24A	Análise de variância (ANOVA) para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, antes das operações de preparo..... 171
Tabela 25A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a umidade em base peso, na época da colheita..... 171
Tabela 26A	Análise de variância (ANOVA) para a umidade em base peso em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita..... 172
Tabela 27A	Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita..... 172
Tabela 28A	Análise de variância (ANOVA) para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita..... 172

	Página
Tabela 29A Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo do solo para a densidade de raízes.....	173
Tabela 30A Análise de variância (ANOVA) para medidas repetidas da densidade de raízes em diferentes profundidades dentro de sistema do preparo do solo.....	173
Tabela 31A Resultados de altura de planta do feijoeiro para os tratamentos de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, por data, em Campinas – SP, no ano de 1999.....	174
Tabela 32A Análise de variância (ANOVA) para a altura de planta em diferentes dias após a emergência dentro do sistema de preparo do solo.....	176
Tabela 33A Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo do solo para as componentes da produção.....	176
Tabela 34A Resultados de umidade média do solo observados ao longo do ciclo do feijoeiro, no período de 6 a 81 DAE, nas parcelas sob diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas - SP, no ano de 1999.....	176

INFLUÊNCIA DO MANEJO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOBRE A EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO IRRIGADO.

Autor: Gerson Araujo de Medeiros

Orientador: Prof. Luiz Antonio Daniel

Co-orientador: Prof. Edson Eiji Matsura

RESUMO

A escassez da água tem levado à necessidade do uso racional e do desenvolvimento de técnicas e manejo que possibilitem a sua economia ou aumento da eficiência do seu uso, especialmente na agricultura, maior setor demandante na sociedade. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo testar a hipótese de que o tipo de preparo e o manejo do solo afetam as características físicas do solo, o desenvolvimento, a produtividade, o consumo e a eficiência do uso da água do feijoeiro irrigado. O experimento desenvolveu-se em parcelas experimentais em um Latossolo vermelho localizadas na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, as quais vem sendo manejadas com os mesmos tratamentos ao longo de um período de oito anos. Os tratamentos avaliados foram o sistema escarificador, o sistema convencional com arado de disco e o sistema enxada rotativa. O sistema de preparo do solo alternado, utilizando o arado de aiveca em 1999, foi escolhido como parcela de referência para estudo da intensidade de estresse hídrico do feijoeiro, ao longo do ciclo, monitorado com o auxílio de um termômetro infravermelho. Os parâmetros físicos do solo que apresentaram diferença significativa entre os tratamentos foram textura, densidade, resistência do solo à penetração, infiltração básica, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, capacidade de armazenamento de água. Contudo, somente a infiltração básica, a porosidade total, a macro e microporosidade, a profundidade da camada compactada e o gradiente de resistência à penetração do solo foram os parâmetros que indicaram o melhor desempenho de produção e eficiência do uso da água do feijoeiro. Houve pouco efeito dos tratamentos sobre o crescimento do feijoeiro, à exceção dos parâmetros altura da planta. A semelhança no desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo provocou um

consumo acumulado de água total muito próximo, atingindo 335, 350 e 305 mm, respectivamente, para os tratamentos escarificador, arado de disco e rotavação, como consequência, o consumo de água foi fortemente dependente do desempenho da cultura. Os sistemas de preparo do solo sob o mesmo manejo de água afetaram significativamente a produção e, portanto, a eficiência do uso da água. O sistema de preparo com escarificador apresentou melhor distribuição do sistema radicular, porém não significativa, em relação aos demais tratamentos. O melhor enraizamento possibilitou maior eficiência na extração de água em profundidade e o menor índice de estresse hídrico acumulado ao longo do ciclo do tratamento escarificador em relação aos demais, proporcionando uma produção e eficiência do uso da água significativamente maiores.

Palavras-chave: feijão irrigado, solos-manejo, irrigação, água-uso, produtividade agrícola.

THE INFLUENCE OF TILLAGE ON WATER USE EFFICIENCY AND YIELD OF BEANS CROPPED ON LATOSSOLO VERMELHO.

Author: **Gerson Araujo de Medeiros**

Adviser: **Prof. Luiz Antonio Daniel**

Prof. Edson Eiji Matsura

ABSTRACT

The water resources scarcity has demanded a rational use and development of management techniques to save or to increase the water use efficiency, especially in agriculture, the greatest water demander of society. In this way, the main goal of this research was to investigate the influence of soil tillage on soil physics characteristics, crop development, productivity, water consumption and water use efficiency of beans, cultivated on Latossolo vermelho, a clay soil. The experiment was carried out at Faculdade de Engenharia Agrícola of Universidade Estadual de Campinas, in September to December period of 1999. The crop production system was the same during 8 year with the following tillage treatments: chisel ploughing, disk ploughing, revolving hoe. The treatment corresponding to alternate soil tillage (moldboard ploughing in 1999) was maintained with low soil water tension along the season and it was used as a reference to evaluate the water stress periods of the other treatments measured at experimental plots by an infrared thermometer. The following soil physical parameters presented significative differences ($P < 0,05$) among treatments: texture, density, soil penetrometer resistance, infiltration rate, total porosity, macro-porosity, micro-porosity, water holding capacity. However, only infiltration rate, total porosity, macro-porosity, micro-porosity, compacted soil layer depth and gradient of soil penetrometer resistance were parameters that indicated the better performance related to yield and water use efficiency of beans. There were no significative differences among soil tillage treatments relative to plant growth parameter except canopy height. The total water consumption was 335, 350 and 305 mm to chisel ploughing, disk ploughing and revolving hoe, respectively, demonstrating a strong dependence of water consumption on crop growth performance. A significative effect of soil tillage on yield and water use efficiency was observed among treatments performed on

the same irrigation management. Reduced tillage presented the better root development along soil profile, even though it was not significative, compared to disk ploughing and revolving hoe. The chisel ploughing treatment was more efficient to extract water at deeper soil layer so the water stress index accumulated was lowest along the season and probably led to a significative higher yield performance and water use efficiency of beans.

Keywords: irrigated beans, soil management, irrigation, water use, productivity agricultural.

1. Introdução

A intensificação do uso da terra pelo emprego de técnicas como a irrigação tem proporcionado o aumento anual do número de safras, redução dos riscos do empreendimento e melhorias na produtividade (Arruda et al., 1994). Estes fatores e os incentivos dos Governos Federal, Estadual e de alguns municípios levaram ao crescimento anual médio de 7% nas décadas 70/80 e de 10% nas décadas 80/90 da área irrigada no Estado de São Paulo.

Uma das conseqüências deste crescimento foi o aumento relativo do consumo de água pela agricultura irrigada, estimada em torno de 25% da demanda no período da seca em São Paulo (São Paulo, 1990), levando à criação de programas e normas para a racionalização do uso da água por parte do Governo Estadual.

Técnicas conservativas de água na agricultura assumem, portanto, considerável importância seja para economizar o recurso hídrico, seja para otimizar a eficiência do seu uso. Por esse motivo, programas de desenvolvimento de tecnologias melhoradas e práticas de manejo de irrigação têm sido apontados como indispensáveis para a produção sustentável de alimentos de países em desenvolvimento (Jensen et al., 1990).

Entre as técnicas que possibilitam o aumento da eficiência do uso da água está o manejo de irrigação, pois objetiva fornecer água para a cultura no momento e na quantidade necessária para o seu pleno desenvolvimento, evitando-se desperdícios. Contudo, o aumento da eficiência do uso da água está associado também a outras práticas como controle de pragas e doenças, fertilidade, variedade, densidade de plantio, manejo do solo, etc.

O potencial produtivo do solo também está relacionado com o aumento da eficiência do uso da água, sendo afetado pelo manejo e intensidade do seu cultivo ao longo dos anos. Na agricultura irrigada, é comum realizarem-se cinco plantios em um período de dois anos, e essa intensificação do uso do solo pode acelerar ou potencializar a sua degradação.

A influência dos sistemas de preparo sobre a degradação do solo e suas características físico-hídricas e sobre o desenvolvimento e a produtividade das culturas tem sido predominantemente estudada em condições de cultivo das águas. Poucos estudos, porém, direcionam para o efeito do manejo do solo sobre o desempenho e consumo de água das plantas, incluindo o feijoeiro, sob condições irrigadas, tampouco em áreas manejadas da mesma forma após um período de anos suficiente para que modificações tenham sido impostas.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar o efeito dos sistemas de preparo do solo sobre a produção, consumo e eficiência do uso da água do feijoeiro irrigado, semeado em Latossolo vermelho, inserindo-o em uma linha de investigação de técnicas conservacionistas do solo e água na agricultura irrigada.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar o efeito do preparo do solo sobre suas características físico-hídricas;
- Avaliar o efeito do preparo do solo no crescimento e produção da cultura do feijoeiro irrigado sob o mesmo manejo de água;
- Determinar o consumo sazonal, a eficiência do uso da água e simular a evapotranspiração do feijoeiro irrigado, nos diferentes sistemas de preparo, a partir do desenvolvimento da cultura, e verificar a utilização de uma única curva de coeficiente de cultura para estimar o uso consuntivo da água;
- Identificar os parâmetros que possam ter contribuído para o desempenho da cultura sob condições de campo.

2. Revisão de Literatura

A agricultura é um importante setor econômico responsável pela produção de alimentos e geradora de emprego nas áreas rurais, contribuindo significativamente para a estabilidade social e crescimento econômico de muitos países como o Brasil (Dumanski et al., 1997). Segundo esses mesmos autores, um dos desafios para a agricultura é a necessidade de aumentar a produção de alimentos para atender a uma demanda crescente, sob condições de escassez de recursos naturais. Esse aumento da produtividade pode ser alcançado por meio do manejo melhorado das terras cultivadas, particularmente do manejo de nutrientes, conservação do solo e da água, e tecnologias relacionadas ao uso mais eficiente dos recursos naturais.

Nesse contexto, o sistema de preparo é um dos fatores com maiores condições de provocar alterações nas características naturais do solo (Lucarelli, 1997).

As técnicas de preparo do solo podem ser enquadradas, basicamente, em dois grupos, a saber: (a) sistema reduzido ou conservacionista e (b) sistema convencional. O sistema convencional, que utiliza implementos como arado de discos, aiveca e grade pesada, seguido de gradagens leves, tem como característica principal um revolvimento de toda a área a ser cultivada, onde o implemento atua com a incorporação total ou quase total do resíduo. Por outro lado, os sistemas de preparo reduzidos, como o escarificador, promovem o arrasto de hastes que cortam o solo quebrando superficialmente a sua estrutura, sem revolvê-lo intensamente, procurando não destruir os agregados e deixando maior quantidade de resíduo na superfície do terreno (Lucarelli, 1997).

A influência do sistema de preparo e manejo sobre uma série de características físicas do solo tem sido investigada por vários autores (Guimarães, 2000, De Maria et al., 1999, Urchei et al., 1996, Castro, 1995, Lucarelli, 1997, Daniel et al., 1996).

Os parâmetros mais estudados são os que afetam a capacidade de armazenamento de água no solo como a textura, a estrutura, a porosidade e a densidade. Conseqüentemente, o consumo de água pelas plantas e o manejo da irrigação, os quais são dependentes da capacidade do solo em armazenar e distribuir a água na zona radicular, também são afetados pelo sistema de preparo e manejo dado ao solo.

Estudos indicam que uma cobertura com resíduos de cultura diminui praticamente a zero as perdas de solo e mantém seu conteúdo de matéria orgânica e umidade, além de outros benefícios, tal como a boa estruturação.

Em geral, os sistemas de preparo que mobilizam menos o solo e que mantêm boa quantidade de restos culturais conseguem ampliar o número de agregados maiores e mais resistentes à ação da chuva (Lucarelli et al., 1998). Isso se deve, segundo tais autores, à própria ação do implemento, que não pulveriza o solo mantendo, já no preparo, além de agregados maiores, maior quantidade de matéria orgânica, servindo para melhorar a estabilidade dos próprios agregados e facilitar a infiltração. Além disso, o acúmulo de resíduos na superfície do solo, nestes sistemas, ajuda a manter a água no corpo do solo, a diminuir as perdas por evaporação e a aumentar a taxa de infiltração (Derpsch et al., 1986).

Roth & Meyer (1983), estudando a infiltração em um Latossolo roxo sob três sistemas de preparos (convencional, escarificador e plantio direto), observaram que a taxa final de infiltração mais elevada correspondeu aos sistemas de plantio direto e escarificador.

Entre os sistemas conservacionistas, o plantio direto e o cultivo mínimo acarretam, muitas vezes, valores de densidade do solo maior ou igual aos convencionais (Castro, 1995, Bruce et al., 1990, Hill, 1990, Albuquerque et al., 1995), mas a infiltração de água é maior, assim como sua disponibilidade, uma vez que os poros apresentam tamanhos maiores.

Segundo Castro (1995), em áreas sob sistema de preparo convencional, realizado sempre a uma mesma profundidade, é comum formar-se gradativamente uma camada subsuperficial compactada. Essa camada pode ficar muito densa, o que acarretará diminuição da taxa de infiltração de água e dificuldade na penetração de raízes, reduzindo o desenvolvimento da planta, ou por falta ou por excesso de água, e por deficiência na nutrição. O mesmo autor verificou que o solo superficial preparado fica bastante desagregado, levando

ao seu selamento por ocasião das chuvas, o que irá impedir uma adequada infiltração; além disso, anos sucessivos de cultivo convencional tendem a reduzir, cada vez mais, a velocidade de infiltração.

A influência do sistema de preparo do solo sobre as características físicas de um Latossolo vermelho tem sido demonstrada em estudos realizados na Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, desde 1990. O uso contínuo de oito distintos sistemas levou a uma diferenciação na perda de sedimentos, formação da camada compactada e taxa de infiltração, estabilidade e distribuição dos agregados, matéria orgânica e nutrientes entre outras. (Daniel et al., 1996, Daniel et al., 1997, Lucarelli et al., 1996, Lucarelli, 1997, Lucarelli et al., 1998).

Dentre os sistemas de preparo motomecanizado, os de preparo do solo alternado, escarificador e convencional com arado de disco tiveram valores próximos de perda de solos média, no período de 1990 a 1996, correspondendo a 0,585, 0,525 e 0,607 t ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente. Já o sistema de rotação foi o que apresentou uma das maiores perdas médias de solos correspondendo a 1,5 ton ha⁻¹ ano⁻¹ (Lucarelli, 1997).

A cobertura morta é um dos principais fatores relacionados ao sistema de preparo e manejo do solo e apontada por vários autores como responsável pela maior produtividade do feijoeiro sob plantio direto, propiciando menores valores e menor variação ao longo do ciclo da tensão matricial da água no solo em comparação aos demais sistemas (Stone & Silveira, 1999, Urchei e al., 2000). Isso se dá mesmo que a área esteja, pela primeira vez, sob esse sistema de preparo como observam Urchei et al. (2000).

O efeito da palhada sobre a produtividade do feijoeiro também foi verificado por Stone & Moreira (2000). De acordo com os autores, o tratamento plantio direto com palhada rala e rapidamente decomposta não se destacou em relação ao mesmo sistema com cobertura morta de acículas de pinheiro, de decomposição lenta, propiciando adequada cobertura do solo.

Por outro lado, quando comparados o plantio direto e a enxada rotativa, sob as mesmas condições de palhada sobre a superfície do solo, Chagas et al. (1994) não encontraram diferenças significativas na produção do feijoeiro em dois anos de cultivo.

As variações climáticas também exercem influência sobre os efeitos dos sistemas de preparo do solo na produtividade do feijoeiro e de outras culturas. Xu & Pierce (1998), em estudo com o feijoeiro, Azooz & Arshad (1998), com canola e cevada, e Ghaffarzadeh et al. (1997), avaliando o desempenho de milho, soja e aveia, constataram que o plantio direto apresentou menores produções nos anos com maior precipitação.

A compactação do solo e sua interação com o desenvolvimento radicular e produção é outro fator que tem sido avaliado para o feijoeiro (Stone & Silveira, 1999). O uso de sistemas que revolvam o solo mais profundamente, como o arado de aiveca, e que proporcionem melhor qualidade do leito de semeadura contribuindo para a obtenção de menores valores de densidade foi apontado por Wutke et al. (2000) como fator de manejo que favoreceu o enraizamento do feijoeiro em comparação ao arado de disco.

Kluthcouski et al. (2000) observaram que a aração profunda com aiveca resultou nos melhores rendimentos do feijoeiro, quando introduzida em área com plantio direto por um período de oito anos, os resultados obtidos com escarificador foram intermediários.

Por outro lado, Silveira et al. (1994) não observaram efeitos significativos sobre a produtividade do feijoeiro cultivado sob sistema de preparo aiveca nas profundidades de 0,15 e 0,30 m.

Dependendo da intensidade do uso do sistema de preparo pode-se alcançar resultados muito distintos num mesmo ensaio.

O uso contínuo do arado aiveca por seis anos, em cultivos de verão/inverno, levou aos estatisticamente menores rendimentos de grãos da cultura do feijoeiro quando comparado aos sistemas arado aiveca (novembro-dezembro) alternado com grade aradora (maio-junho), grade aradora e plantio direto, em rotação com as culturas arroz, feijão, milho e soja, em ensaios desenvolvidos por Silveira et al. (2001). Contudo, a maior produção em todos os anos avaliados, foi obtida também pelo sistema arado aiveca, só que em combinação com a grade aradora.

O rendimento superior de grãos do feijoeiro com esta combinação de sistemas de preparo deve-se à possível diminuição da movimentação excessiva com mistura de camada de

solos provocada pelo arado aiveca, e compactação (pé-de-grade) provocada pela grade aradora. (Silveira et al., 2001)

Xu & Pierce (1998) verificaram que o sistema de plantio direto submetido à subsolagem antes do cultivo apresentou melhores resultados em comparação ao mesmo sistema sem a utilização do subsolador.

Nem sempre o melhor enraizamento da cultura proporcionará maiores valores de produção do feijoeiro. Stone & Silveira (1999) constataram que a melhor distribuição do sistema radicular, no preparo com arado aiveca, não propiciou maior produtividade do feijoeiro em comparação aos sistemas de preparo do solo grade aradora e plantio direto.

Para a cultura do feijoeiro, este efeito tem sido por vezes benéfico e proporcionado maiores produções pelo sistema plantio direto, pois a cobertura morta mantém potenciais mais elevados de água no solo ao longo do ciclo (Stone & Moreira, 1999, Urchei et al., 2000) além de elevar a eficiência do uso da água no feijoeiro (Stone & Moreira, 1999, Barros & Hanks, 1993).

A variabilidade dos efeitos do manejo do solo sobre o rendimento de grãos e desenvolvimento de cultura do feijoeiro está associada não só ao implemento utilizado, mas a outros fatores como o histórico da área do ensaio, a variedade de feijoeiro utilizada, a fertilidade, ao histórico da cultura ao longo do ciclo, as condições climáticas no ano agrícola, as variações nos tratos culturais, se a cultura é ou não irrigada e se está sujeita ao estresse hídrico, etc. Por essas razões, tem sido bastante variável na literatura o comportamento do feijoeiro sob diferentes manejos do solo (Kluthcouski et al., 2000).

A avaliação de técnicas de manejo do solo que potencializem a produção da cultura com o emprego de uma técnica como a irrigação, nos dias atuais, assume considerável importância devido à escassez de recursos hídricos e pelo fato de a agricultura irrigada ser um dos setores que historicamente mais demandam água na sociedade. Poucos estudos, porém, atentam para o efeito do manejo do solo sobre a eficiência do uso da água, principalmente em culturas como o feijoeiro.

Hatfield et al. (2001) afirmam que as práticas do manejo do solo afetam os processos de evapotranspiração devido às modificações da disponibilidade de energia, disponibilidade

de água no perfil do solo, ou a taxa de trocas entre o solo e a atmosfera. Os mesmos autores comentam que as práticas relacionadas ao manejo da cultura, como a adição de fósforo ou nitrogênio, têm um efeito indireto sobre o uso de água por meio da eficiência fisiológica da planta.

Dentre os principais fatores relacionados ao sistema de preparo e manejo do solo, está o que vários autores consideram como responsável pela maior eficiência do uso da água do feijoeiro e de outras culturas: a cobertura morta, que propicia menores valores e menor variação ao longo do ciclo da tensão matricial da água no solo em comparação aos demais sistemas (Aase & Pikul, 1995, Sharrat, 1998, Azooz & Arshad, 2000). Contudo, o efeito positivo dessa cobertura depende das condições climáticas, da quantidade e do tipo de cobertura e mesmo da variedade.

Azooz & Arshad (2000) avaliaram a eficiência do uso da água na cevada e canola submetidas aos sistemas de preparo convencional e plantio direto no Canadá, e mais um sistema em que a palhada era mantida numa faixa de 0,075 m de largura na linha da cultura, denominado plantio direto modificado, durante dois anos de ensaio e em dois tipos de solo.

O manejo de resíduos sob o sistema plantio direto modificado resultou em um uso mais eficiente da água do solo em relação ao sistema convencional no ano mais seco e em uma maior eficiência do uso da água quando comparado ao sistema plantio direto sob condições de solo mais úmidas.

Aase & Pikul (1998) observaram que o sistema plantio direto foi mais eficiente em comparação a sistemas que provocaram maior mobilização do solo no que se refere à produção e eficiência do uso da água do trigo e cevada pela melhora da disponibilidade de água no solo ocasionada com a redução na evaporação.

Trabalhos com feijoeiro irrigado nos quais se relacionam sistema de preparo e manejo do solo têm demonstrado que a presença de cobertura morta também melhora a eficiência do uso da água do feijoeiro (Stone & Moreira, 2000), e que esta influência positiva pode variar com a cultivar.

Stone & Moreira (2000) observaram que o plantio direto apresentou uma economia de água em relação aos sistemas de preparo arado e aiveca e grade pesada para as cultivares

Safira e Aporé respectivamente. A economia menos expressiva da cultivar Aporé, de 14%, em relação à Safira, de 30%, deveu-se à diferença na arquitetura entre as duas cultivares do feijoeiro; a primeira compõe-se de plantas mais prostradas, segundo os mesmos autores.

A presença de cobertura morta elevou a eficiência do uso da água e biomassa em 0,362 kg m⁻³ e 0,195 kg m⁻³ para o feijoeiro submetido a diferentes níveis de irrigação (Barros & Hanks, 1993).

A lâmina de irrigação e a dosagem de nitrogênio são outros fatores que influenciam a eficiência do uso da água do feijoeiro, como observado em Calvache et al. (1997).

Tanaka (1990) estudou o efeito da remoção do perfil do solo e tratamentos de dosagem de nitrogênio e fósforo sobre a eficiência do uso da água e produção do trigo. Os tratamentos de remoção do solo não influenciaram a quantidade de água utilizada, mas reduziram significativamente a eficiência do uso da água, conforme aumentou a camada de solo removida, de 0,0 a 0,18 m de profundidade. O autor concluiu que para sustentar uma produção ambientalmente aceitável nos Estados Unidos, são necessárias práticas de manejo conservacionistas no que se refere à perda de solos.

Além do manejo do solo, o manejo da irrigação é outro fator relevante para a manutenção de altos índices de produtividade e, conseqüentemente, para o incremento da eficiência do uso da água pela cultura. Uma informação básica e importante para o bom manejo da água na agricultura irrigada refere-se ao consumo de água pela planta.

Os fatores mais importantes que determinam o requerimento de água pela cultura são, em ordem de importância, segundo Doorenbos & Pruitt (1976): o clima, a cultura e suas características de crescimento, umidade do solo, prática agrícola e de irrigação, e outros fatores que influenciam a taxa de crescimento (fertilizantes, doenças, infestações, etc.).

Portanto, o uso consuntivo das culturas pode ser bastante variável com as condições mesológicas, e necessita ser acuradamente determinado para garantir um eficiente e econômico uso da água na produção vegetal.

Um dos métodos mais utilizados, em irrigação, para avaliar o consumo de água de lavouras comerciais calcula a evapotranspiração máxima (ET_m), por meio da seguinte equação (Doorenbos & Kassan, 1979):

$$ET_m = k_c ET_0 \quad (1)$$

onde, k_c é o coeficiente de cultura (adimensional); e ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O termo ET_0 refere-se à evapotranspiração de uma dada cultura, bem adaptada e escolhida para servir de referência, dentro de dadas condições climáticas, sob condições advectivas adequadas (efeito de advecção desprezível) e com um regime padronizado de fornecimento de água, apropriado para essa cultura e para a região considerada (Perrier, 1984).

Entre os métodos para determinação da evapotranspiração de referência, a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) tem difundido e recomendado a adoção do método de Penman-Monteith como padrão para fins de irrigação e aconselhado sobre procedimentos para o cálculo dos vários parâmetros (Allen et al., 1998). A cultura de referência é definida como uma cultura hipotética com altura assumida de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23, assemelhando-se à evaporação de uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme, sombreando completamente o solo, crescendo ativamente e adequadamente molhada.

O coeficiente de cultura leva em conta os efeitos combinados das características de perda por evaporação de solo e planta e, segundo Pereira & Allen (1997), representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura daquela de referência, ou seja, *a altura da cultura* que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; *a resistência de superfície relativa ao par cultura - solo*, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estômatos), pela fração da cobertura vegetal do solo, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de umidade na superfície do solo; *o albedo da superfície cultura-solo*, que é influenciado pela fração de cobertura vegetal e pela umidade na superfície do solo e influencia a radiação líquida disponível na superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Este coeficiente tem, portanto, um complexo significado físico e implicações biológicas que necessitam ser adequadamente compreendidos e modelados.

A FAO, pelos seus boletins n.º 24 (Doorenbos & Pruitt, 1976), n.º 33 (Doorenbos & Kassan, 1979) e mais recentemente o n.º 56 (Allen et al., 1998) foi quem melhor avançou na operacionalização e divulgação do conceito apresentado na equação 1.

No Brasil, o coeficiente de cultura k_c tem sido determinado em estudos caros e demorados de balanços hídricos em culturas irrigadas, os quais se apresentam em forma de funções ou de tabelas, relacionadas à idade ou à fase fenológica da planta, tais como as difundidas pela FAO, inclusive para o feijoeiro. Os resultados, além de numericamente reduzidos, não se adaptam às situações em que, invariavelmente, o desempenho das culturas em áreas de produção comercial diferem daquelas apresentadas nos ensaios experimentais. Essas diferenças referem-se ao crescimento variável das lavouras em relação às condições experimentais, principalmente devido à exposição e ao relevo, à alta variabilidade espacial e desuniformidade intrínseca do solo, situações climáticas e variações diversas, que geralmente ocorrem no manejo da cultura, como a densidade de semeadura, adubações, ou a fatores que provoquem a quebra no rendimento potencial da planta, incidência de doenças, ataque de pragas e outros. Esse elenco de fatores pode mesmo impedir o recobrimento total do solo pela cultura, fato comum em condições tropicais e subtropicais. (Medeiros & Arruda, 1997)

Abordagens mais avançadas no conceito do coeficiente de cultura levaram-no a desmembrar-se em componentes, a fim de considerar a influência de fatores relacionados com a resistência à perda de água das superfícies evaporantes do solo e planta. Uma das mais difundidas foi apresentada por Wright (1982). Esse autor desmembrou o coeficiente de cultura, explicitando a forma para quantificar a evaporação do solo e transpiração da planta para uso em modelos de simulação e aplicação em rotinas de cálculo computacional, e introduziu o conceito do coeficiente de cultura basal (k_{cb}). O coeficiente de cultura foi calculado da seguinte forma:

$$k_c = k_a * k_{cb} + k_s \quad (2)$$

onde, k_{cb} é o coeficiente de cultura basal, obtido quando a evaporação do solo é mínima mas a umidade do solo na zona das raízes é adequada, não limitando o crescimento da planta ou transpiração; k_a é o coeficiente relacionado à disponibilidade de umidade do solo; k_s é o coeficiente de incremento relacionado ao umedecimento da superfície após chuva ou irrigação.

Wright (1981) e Wright (1982) apresentam uma série de curvas de coeficiente de cultura basal determinadas em lisímetros de pesagem e procedimentos para o cálculo dos termos k_a e k_s , dependentes de parâmetros relacionados ao solo como água disponível e número de dias para o secamento da superfície.

A proposta de Wright (1982) obteve grande repercussão, o que fez com que a FAO adotasse essa conceituação para o coeficiente de cultura (Allen et al. 1998). No Brasil, porém, poucos trabalhos endereçaram para o coeficiente de cultura basal, destacando-se Mello (1992), Leme et al. (1997) e Medeiros et al. (2001), dentre outros.

Medeiros et al. (2001) determinaram o coeficiente de cultura basal para o feijoeiro semeado em evapotranspirômetros adaptados, conforme descrito em Medeiros & Arruda (1998). Os valores obtidos de k_{cb} foram, então, relacionados a índices de desenvolvimento de planta, como a porcentagem de cobertura vegetal sobre o solo (%CVeg) e o índice de área foliar (IAF).

O desempenho e a transferibilidade das relações obtidas para as condições de uma lavoura irrigada, semeada sob duas densidades de plantio, demonstraram a estreita relação do coeficiente de cultura com fatores ligados ao desenvolvimento da planta.

As relações altamente significativas encontradas por Medeiros et al. (2001) foram derivadas a partir de uma cultura semeada em evapotranspirômetros, com suprimento contínuo de água para a planta e com um solo homogeneizado. Em condições de campo, porém, parâmetros do solo podem afetar consideravelmente o desenvolvimento e consumo de água das plantas e o manejo de irrigação mesmo em pequenas áreas.

A água disponível do solo para as plantas é um conceito muito utilizado em manejo de água para a irrigação. Nesta abordagem, o solo é visto como um reservatório de água para as

plantas, em que o limite superior e inferior corresponderiam aos teores de umidade na capacidade de campo e ponto de murcha respectivamente.

Um nível intermediário de umidade e, conseqüentemente, de água disponível é comumente arbitrado para permitir a máxima depleção de água no solo, antes que o crescimento da planta possa ser reduzido. Para a cultura do feijoeiro, tem sido recomendada uma depleção correspondente a 50% da disponibilidade de água no solo (Halterlein, 1983, Sakai, 1989). Contudo, a taxa de retirada de água que sustentaria o crescimento normal da planta em qualquer momento determinado não só depende do estado da água do solo, mas também das condições atmosféricas, da demanda de evapotranspiração e de características das plantas, como profundidade, densidade e extensão de raízes e ajuste fisiológico da planta ao estresse hídrico (Hillel, 1990; Denmead & Shaw, 1962).

A interação desses parâmetros forma um sistema dinâmico, fisicamente integrado, no qual vários fluxos ocorrem de forma interdependente, sendo denominado de “contínuo solo-planta-atmosfera” por vários autores (Hillel, 1998; Ahuja & Nielsen, 1990). Esse entendimento tem levado a conceitos dinâmicos de disponibilidade de água no solo.

Denmead & Shaw (1962) apresentaram evidência desse conceito dinâmico. Os resultados observados por esses autores mostraram que o momento em que a taxa de transpiração do milho reduziu seu valor máximo foi dependente não só da umidade e água disponível no solo como também da demanda de evapotranspiração da atmosfera.

Em estudos relacionados à avaliação da influência do manejo sobre o consumo de água da cultura, a avaliação do momento em que a cultura começa a entrar em estresse hídrico torna-se importante.

A avaliação da condição hídrica da cultura pode ser feita a partir de técnicas de monitoramento da planta. Dentre estas técnicas, a termometria infravermelha tem sido uma das mais difundidas.

Dentre os métodos relacionados para o monitoramento da condição hídrica da planta, o termômetro infravermelho pode ser uma importante ferramenta para detecção de sintomas de estresse hídrico pela cultura, por medir a temperatura do dossel (Ben-Asher et al., 1992).

Este método baseia-se no fato de que plantas transpirando livremente e a uma taxa máxima (potencial) geralmente apresentam uma temperatura da folhagem inferior à do ar ambiente. Porém, assim que um déficit de água ocorre nas plantas, levando ao fechamento dos estômatos, as folhas começam a aquecer e sua temperatura pode ficar acima daquela do ar circunvizinho.

Conseqüentemente, a diferença de temperatura entre as folhas e o ar adjacente aumenta conforme o estado de estresse se intensifica, particularmente em regiões áridas. (Hillel, 1990).

O desenvolvimento de versões comerciais de sensores infravermelhos tem aumentado o seu uso para determinação da temperatura do dossel vegetativo e planejamento de irrigação (Stockle & Dugas, 1992). A funcionalidade dessa tecnologia para estimar as condições hídricas da planta tem sido comprovada para diversas culturas, incluindo a do feijoeiro (Amorim Neto, 1996, Ben-Asher et al., 1992; Pazzeti et al., 1993, Clawson & Blad, 1982; Bascur et al., 1985, Follegatti, 1988).

Pazzeti et al. (1993) submeteu a cultura do feijoeiro a quatro regimes de irrigação e monitorou a temperatura do dossel com termômetro infravermelho. Os resultados indicaram que a temperatura da copa mostrou um relacionamento estreito com os componentes da produção e a produtividade, bem como a evolução do estresse hídrico, indicando que poderá permitir um melhor aproveitamento da termometria infravermelho no controle de irrigação. O mesmo foi concluído por Bascur et al. (1985), quando se utilizou desta técnica para avaliar a resistência de genótipos do feijoeiro à seca.

O emprego da termometria infravermelha, associado ao balanço de energia, constituiu-se em uma técnica auxiliar ao manejo de irrigação do feijoeiro por Amorim Neto et al. (1996). Os autores obtiveram índices de estresse hídrico próximos para os diferentes manejos de irrigação realizados, contudo, os resultados evidenciaram o potencial do método para o gerenciamento da aplicação de água nessa cultura.

Folegatti (1988) utilizou-se de dados da temperatura do dossel da cultura, monitorada com termômetro infravermelho, para determinar índices de estresse hídrico para a cultura do feijoeiro sob diferentes lâminas. Nesse trabalho, concluiu-se que índice de estresse hídrico baseado no diferencial de temperatura entre o dossel e o ar ambiente tem seu cálculo e uso

dificultado por fatores ambientais, como o déficit de pressão de vapor, e que a utilização de parcelas bem irrigadas como referência compensam os efeitos destes fatores.

Clawson & Blad (1982) avaliaram o desempenho do milho irrigado manejado a partir de dados de temperatura do dossel da planta e concluíram que a variabilidade da temperatura do dossel pode ser usada para indicar o início do estresse hídrico da planta; porém, a severidade deste estresse é provavelmente mais bem indicada pela magnitude da elevação na temperatura média do dossel acima daquela de uma parcela de referência bem molhada.

3. Material e Métodos

3.1. Local do experimento e seu histórico

O trabalho foi desenvolvido na área de pesquisa em Conservação do Solo e Água da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), da Universidade Estadual de Campinas - SP, longitude 47° 05' W, latitude 22° 54' S e altitude média de 606 m.

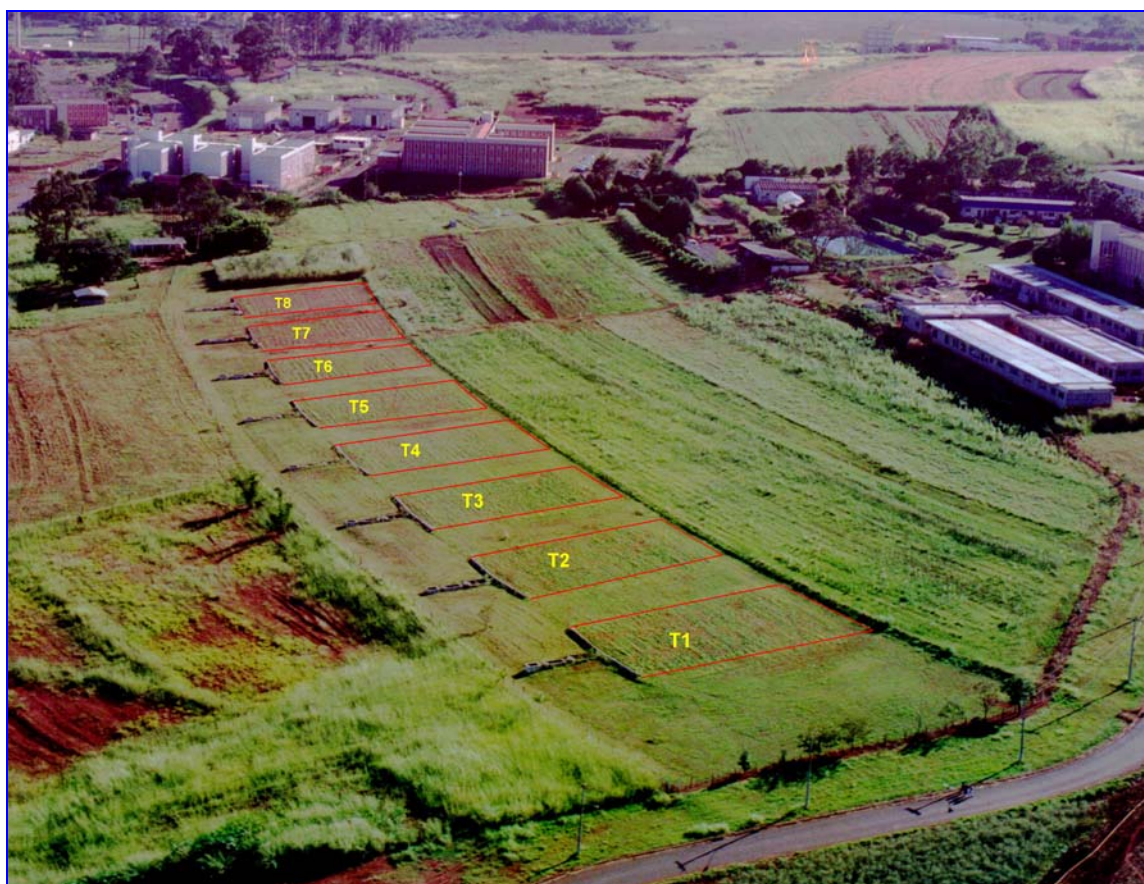
O solo da área foi classificado como Latossolo roxo distrófico, textura argilosa, Unidade Barão Geraldo (Oliveira & Rotta, 1979). Na atual classificação brasileira de solos corresponde ao Latossolo vermelho distroférico, segundo Embrapa (1999).

Em tal área, construíram-se, em 1986, oito talhões coletores de solo e água (Figura 1), cada qual com uma área útil de 600 m², sendo 30 m de comprimento de rampa por uma soleira concentradora de 20 m de largura, localizados no terço médio de uma encosta com 9% de declive, orientação Norte-Sul e exposição Oeste (Daniel et al., 1997).

Nos anos agrícolas de 1986/87, 1987/88, 1988/89 e 1989/90 foram feitas subsolagens a 0,50 m de profundidade, semeando-se crotalária, milho, soja e milho, respectivamente, em todas as parcelas. No período de 1990 a 1998, somente a cultura do milho foi semeada em sete dos oito talhões, trabalhados sob os seguintes sistemas de preparo do solo, de acordo com informações fornecidas pelo Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel¹:

- a) sistema convencional com grade aradora: realiza-se uma gradagem pesada a 0,20 m de profundidade, com grade de 16 discos de 24" e uma outra gradagem pesada, seguida de uma gradagem de destorroamento/nivelamento na época da semeadura;

¹ Professor aposentado da Universidade Estadual de Campinas, idealizador e responsável pela realização e desenvolvimento de ensaios na área experimental de Conservação de Água e Solo da Faculdade de Engenharia Agrícola, desde 1986.



(Foto cedida pelo Eng. José Ricardo Freitas Lucarelli, 1997)

Figura 1. Vista aérea das parcelas experimentais, destacando-se os seguintes sistemas: T1, convencional com grade aradora; T2, alternado de equipamentos; T3, reduzido com escarificador; T4, plantio direto; T5, convencional com arado de disco; T6, talhão roçado; T7, talhão mobilizado “morro abaixo”; T8, enxada rotativa.

- b) sistema alternado de equipamentos: alterna-se, anualmente, o equipamento utilizado no preparo, repetindo-o a cada quatro anos. A seguinte sequência é utilizada: preparo com grade aradora no primeiro ano, seguindo-se de arado de disco, arado de aiveca, e escarificador nos demais anos. No presente ensaio, o equipamento utilizado no preparo foi o arado de aiveca;
- c) sistema arado escarificador: realiza-se a operação com escarificador de cinco hastes flexíveis a 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem leve de destorroamento/nivelamento;
- d) sistema de plantio direto: aplica-se herbicida antes da semeadura, realizando-se uma roçada dez dias depois. Efetua-se semeadura com semeadora adubadora para sistema de plantio direto, sem mobilização prévia do solo;
- e) sistema convencional com arado de disco: utiliza-se arado reversível de três discos de 26” com uma aração de incorporação a 0,20 m de profundidade. À época de semeadura, realiza-se uma segunda aração a 0,25 m de profundidade, seguida de duas gradagens leves para destorroamento e nivelamento;
- f) talhão roçado sem mobilização: parcela utilizada como testemunha de área sem nenhum tipo de mobilização do solo, ou seja, sua vegetação espontânea, predominantemente capim-colonião, é controlada por uma roçada inicial e posteriormente deixada em pousio durante todo o período;
- g) talhão mobilizado “morro abaixo” com arado de disco: essa parcela serve como tratamento para a possível erosão máxima causada pelo preparo de solo com arado reversível de três discos de 26”, com aração no sentido da pendente, o mesmo ocorrendo com a aração e as gradagens de destorroamento e nivelamento prévias à semeadura;
- h) sistema enxada rotativa: o preparo do solo foi realizado com uma única operação de rotavação a 0,18 m de profundidade, com uma enxada rotativa de rotor fixo, cuja operação provoca a incorporação de inços, destorroamento e nivelamento.

O uso contínuo destes oito distintos sistemas levou à diferenciação na perda de sedimentos, formação da camada compactada e taxa de infiltração, estabilidade e distribuição

dos agregados, matéria orgânica e nutrientes entre outras. (Daniel et al., 1996, Lucarelli et al., 1996, Lucarelli, 1997, Lucarelli et al., 1998)

3.2. Cultura

Para o presente estudo, utilizou-se da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade IAC Carioca. Essa cultivar, similar à Carioca 80, apresenta plantas de crescimento indeterminado, guia curta a longa, com início de florescimento de 30 a 35 dias e ciclo de 90 a 95 dias do plantio à colheita. Possui flores de cor branca e vagens de coloração verde-clara, passando a palha quando secas, (Bulisani, 1987). As sementes possuem coloração creme a creme marmorizado com listras havana, porém sem halo alaranjado.

O feijoeiro é uma cultura que encontra melhores condições de desempenho nas fases vegetativa e reprodutiva se as temperaturas médias estiverem entre 17 e 25° C (Pinzan et al., 1994), sendo uma temperatura ótima na fase de florescimento aquela na faixa de $21 \pm 2^\circ \text{C}$ (Laing et al., 1984).

Outra importante característica dessa cultura é a sua pouca tolerância ao déficit hídrico severo, havendo queda significativa na produção se sua ocorrência se der entre as fases de florescimento e enchimento de grãos (Nielsen & Nelson, 1998, Mouhouche et al., 1998, Calvache et al., 1997, Guimarães et al., 1996), e encontrando as condições ideais de desenvolvimento quando o solo apresenta valores reduzidos de tensão de água ao longo do ciclo, conforme verificado por Guimarães et al. (1996), Guerra et al. (2000) e Medeiros et al. (2000).

O principal motivo da escolha dessa cultivar foi a sua resistência a diversas raças do fungo da antracnose e da ferrugem e ao vírus do mosaico comum, além de ser a variedade predominante no Estado de São Paulo.

3.3. Condições climáticas durante o ensaio

Os resultados dos principais elementos climáticos ocorridos durante o ensaio (08/09/1999 a 06/12/1999) encontram-se na Figura 2.

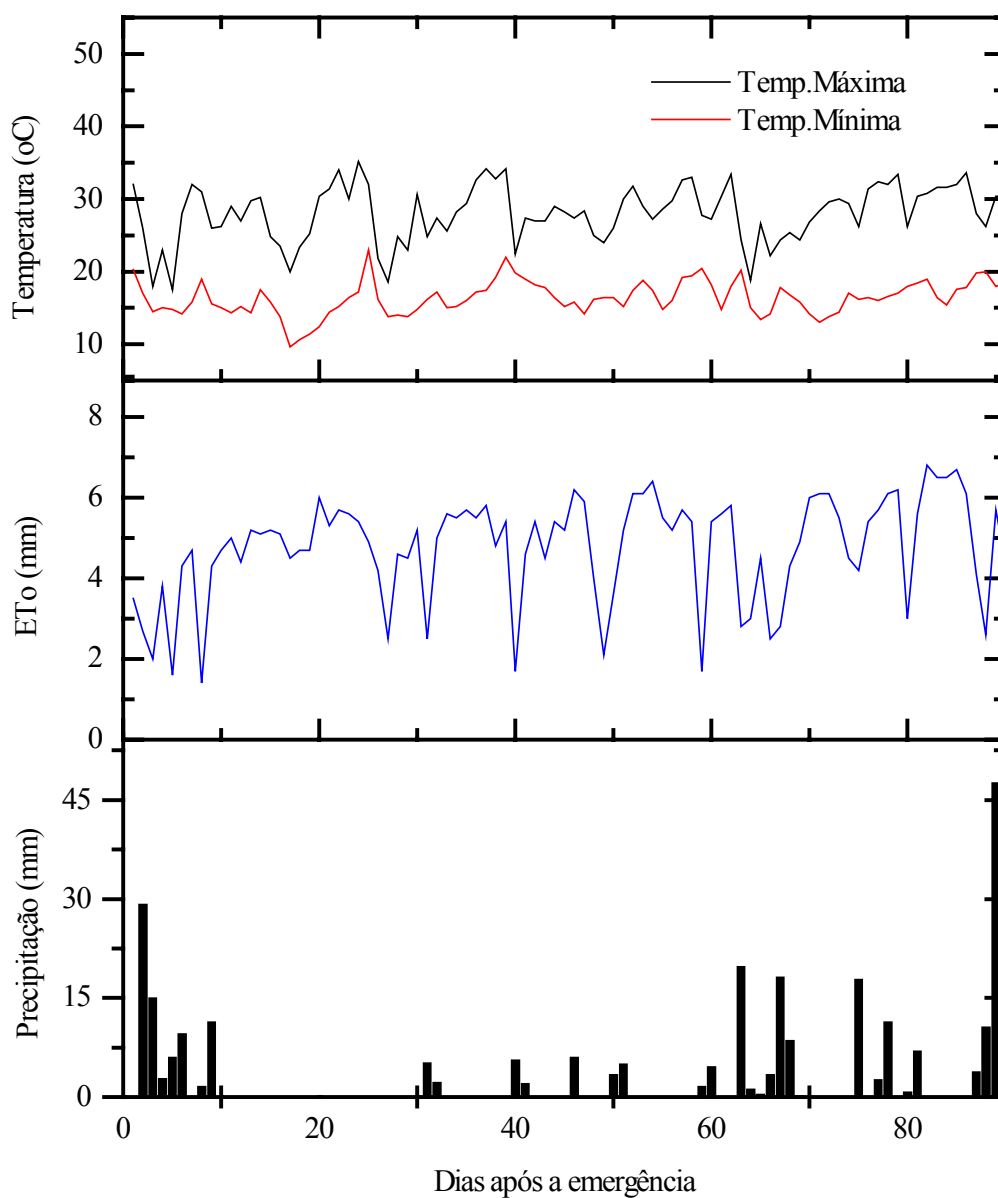


Figura 2. Parâmetros climáticos verificados durante o ensaio do feijoeiro irrigado: temperatura máxima (Temp.Máxima) e mínima (Temp.Mínima), evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith modificado pela FAO (Allen et al., 1998), e precipitação, em Campinas – SP, no período de 8 de setembro a 6 de dezembro de 1999.

Durante o ensaio, a precipitação foi escassa, acumulando 203 mm. Em setembro, as chuvas totalizaram 75,6 mm, correspondendo a 37% da precipitação verificada em todo o ciclo, e ocorreram somente nos oito primeiros dias após a emergência da cultura, de 8 a 15 de setembro.

Em outubro, durante o qual transcorreu o florescimento e início da formação de vagens, a precipitação foi apenas de 29,4 mm, ou 14% do total verificado ao longo de todo o ciclo. Já em novembro, observou-se o maior volume de chuvas ao longo do ensaio, 98 mm, correspondendo a 48% do total. Contudo, 39,6 mm ou aproximadamente 20% do total precipitado, ocorreram nos últimos 10 dias do experimento, quando a cultura já se apresentava senescente.

A temperatura média no período do ensaio foi de 22,2 °C, sendo a média das temperaturas máximas de 28,3 °C e a média das mínimas de 16,2 °C. Para as condições normais de Campinas (1961 a 1990), no período de setembro a novembro, a temperatura média é de 22 °C, sendo a média das temperaturas máximas de 27,9 °C e a média das mínimas de 16,2 °C, de acordo com dados fornecidos pelo Centro de Ecofisiologia e Biofísica do IAC.

Em termos de umidade relativa, nos meses de setembro e outubro obtiveram-se valores médios de 56% e 64% respectivamente, enquanto os valores normais (1961 a 1990) são de 65,5% e 69,2%, respectivamente, para os mesmos meses citados.

A evapotranspiração de referência (ET_0) acumulada durante todo o ensaio atingiu 430 mm e um valor médio diário de 4,7 mm dia⁻¹. Utilizou-se a equação de Penman-Monteith modificada pela FAO (Allen et al., 1998) para o cálculo da evapotranspiração de referência, em uma base diária, por ser o método recomendado pela FAO para a determinação de ET_0 adotando a grama como cultura de referência, por ter um embasamento físico, por incorporar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos e devido ao desenvolvimento de procedimentos para estimar parâmetros climáticos não determinados (Allen et al., 1998), apresentando a seguinte forma:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (3)$$

onde, ET_0 é a evapotranspiração da cultura de referência [mm dia^{-1}]; R_n é a radiação líquida na superfície da cultura [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$]; G é o fluxo de calor do solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$]; T a temperatura média do ar [$^{\circ}\text{C}$]; U_2 a velocidade do vento medida a 2 m de altura [m s^{-1}]; $(e_s - e_a)$ o déficit de pressão de vapor [kPa]; Δ a declividade da curva de pressão de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]; γ a constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]; e 900 um fator de conversão.

Os dados climáticos utilizados para a estimativa de ET_0 foram levantados junto ao posto meteorológico da Faculdade de Engenharia Agrícola, localizado a menos de 100 m de distância do local do ensaio.

O período em que ocorreu a maior demanda evaporativa média para um período de cinco dias deu-se de 28 de outubro a 1^o de novembro de 1999, ou 51 a 55 DAE, quando se atingiu $5,9 \text{ mm dia}^{-1}$. Durante esse período, a cultura alcançou os maiores valores de índice de área foliar, como será discutido nos resultados, e se encontrava na fase de formação de vagens.

Assim, a época durante a qual transcorreu o ciclo do feijoeiro caracterizou-se por apresentar demandas evaporativas altas, déficit hídrico em todos os meses avaliados e má distribuição de chuvas no tempo. Conseqüentemente, as condições climáticas no período em que se desenvolveu o experimento possivelmente não teriam permitido uma produção econômica da cultura do feijoeiro, sem o emprego da irrigação.

3.4. Solo

3.4.1. Levantamentos de fertilidade

A fertilidade do solo foi determinada antes do plantio, em cada tratamento, a partir de amostras compostas de seis subamostras por parcela, coletadas ao acaso, em três profundidades: 0–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m. As análises foram realizadas conforme

metodologia descrita por Raij & Quaggio (1983) em laboratório particular certificado pelo Instituto Agrônômico, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise de fertilidade do Latossolo vermelho submetido aos tratamentos de sistema de preparo do solo, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Tratamento	Prof. cm	P (mg dm ⁻³)	M.O. (%)	pH CaCl ₂	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	S	CTC	V (%)
Alternado	0-20	70,0	6,1	5,7	7,5	65	28	28	100,5	128,5	78,2
	20-40	23,0	4,3	5,6	4,0	54	22	31	80,0	111,0	72,0
	40-60	10,0	3,0	5,4	3,1	37	16	28	56,1	84,1	66,7
Escarificador	0-20	69,0	6,1	5,5	7,1	72	23	31	102,1	133,1	76,7
	20-40	40,0	4,8	5,4	4,2	55	18	28	77,2	105,2	73,3
	40-60	25,0	3,9	5,4	2,5	51	14	31	67,5	98,5	68,5
Arado Disco	0-20	24,0	5,1	5,7	3,9	58	25	28	86,9	114,9	75,6
	20-40	16,0	3,9	5,4	2,2	49	21	34	72,2	106,2	67,9
	40-60	10,0	3,6	5,1	1,8	41	16	38	58,8	96,8	60,7
Rotavação	0-20	21,0	4,9	5,9	1,9	55	35	25	91,9	116,9	78,6
	20-40	16,0	3,4	5,6	1,5	45	31	28	77,5	105,5	73,4
	40-60	6,0	3,4	4,7	0,4	25	12	42	37,4	79,4	47,1

3.4.2. Levantamento dos parâmetros físico-hídricos do solo

A avaliação dos efeitos acumulados provocados pelos diferentes sistemas de preparo consistiu da análise de uma série de propriedades do solo, incluindo: densidade do solo e de partículas, textura, resistência do solo à penetração, condutividade hidráulica saturada, infiltração básica e porosidade total.

As amostragens foram feitas em forma reticulada com os pontos distanciados de 3,5 m, em um total de 40 pontos (Figura 3). Preferiu-se esse tipo de coleta foi preferido à casualizada pelo fato de se manter constante a intensidade de amostragem em toda a área (Reichardt et al., 1986).

Os parâmetros levantados nos primeiros 0,20 m de profundidade foram a textura, densidade real e porosidade total, enquanto a condutividade hidráulica saturada e infiltração básica foram medidas a 0,15 m de profundidade.

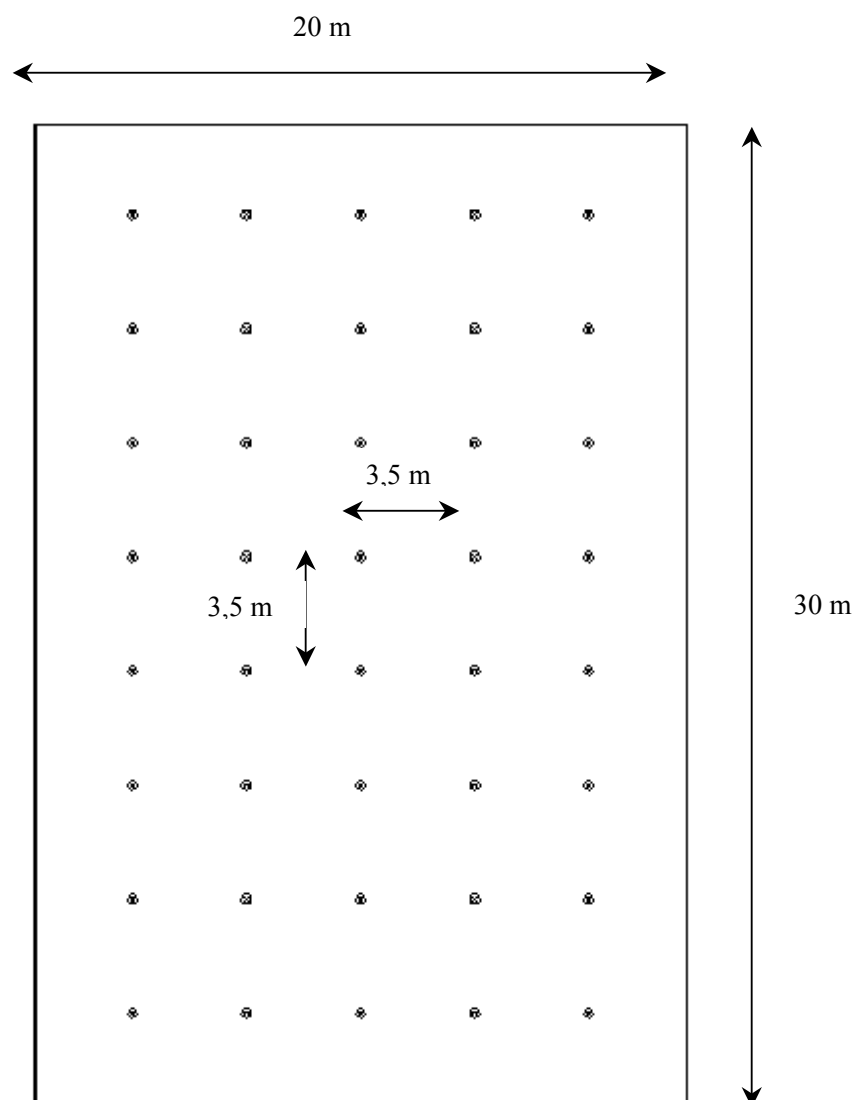


Figura 3. Esquema de amostragem para a determinação da textura, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, condutividade hidráulica saturada, infiltração básica e resistência do solo à penetração.

A densidade do solo foi determinada até a profundidade de 0,40 m, em intervalos de 0,10 m, e a resistência do solo à penetração foi obtida até a profundidade de 0,50 m, em intervalos de 0,05 m.

Calculou-se a porosidade total (P) em cada ponto da malha a partir da seguinte relação (Hillel, 1998):

$$P = \left(1 - \frac{D_p}{D_s} \right) 100 \quad (4)$$

onde, P é a porosidade total do solo [% em volume], D_p a densidade de partículas [Mg m^{-3}] e D_s a densidade do solo [Mg m^{-3}].

A textura e a densidade de partículas foram determinadas no Laboratório de Solos da FEAGRI. Quantificou-se o teor de argila pelo método da pipeta, separou-se a fração de areia por meio de tamisamento e, por diferença, o teor de silte, após a dispersão da terra fina seca ao ar com NaOH a 0,1 N e agitação mecânica (Camargo et al., 1986). O procedimento adotado para a determinação da densidade de partículas é descrito em Embrapa (1997).

Determinou-se a condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) e a infiltração básica (I) por meio do permeâmetro de Guelph, segundo método descrito por Reynolds & Elrick (1986), nos pontos relacionados na Figura 3. Para esta avaliação, abriu-se um orifício no solo com trado apropriado até a profundidade de 0,15 m, limpando-se o fundo com outro trado específico, o qual retirou os torrões e solo solto, deixando-o com forma cilíndrica e raio de 0,03m.

Realizaram-se as medições, usando-se as cargas hidráulicas de 0,03 e 0,06 m, seguindo metodologia adotada pelo Centro de Solos e Recursos Agroambientais do IAC.

A equação básica resultante para a condição de fluxo sob carga constante (H), dentro do orifício cilíndrico de raio a, é:

$$Q = \left(\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right) k_{fs} + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \Phi_m \quad (5)$$

onde Q é o fluxo para manter a carga hidráulica H constante no interior do orifício [$\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$], H é a carga hidráulica no interior do orifício [cm], C é um fator que considera a geometria das medições, determinado graficamente, de acordo com a textura do solo, Φ_m é o fluxo matricial [$\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$], e a é o raio do orifício [cm].

A equação 5 possui duas incógnitas, por isso optou-se pela realização do ensaio com duas cargas hidráulicas seguidas de 0,03 e 0,06 m, obtendo-se um sistema com duas equações e duas incógnitas cuja resolução leva a obtenção de k_{fs} e Φ_m .

Calculou-se a infiltração básica a partir dos dados levantados durante o ensaio de condutividade hidráulica saturada para a carga de 0,06 m, por meio do seguinte equacionamento:

$$I = 60 \left(\frac{d_p^2}{d_0^2 + 4d_0 H_2} \right) Q \quad (6)$$

onde I é a infiltração básica [mm h^{-1}], d_p é o diâmetro do reservatório do permeâmetro de Guelph (cm), d_0 é o diâmetro do orifício (cm), H_2 é a segunda carga hidráulica utilizada de 0,06 m, Q é o fluxo constante medido (mm min^{-1})

O valor de I obtido pela equação 6 é uma estimativa da permeabilidade no solo sob fluxo tridimensional e, portanto, difere do valor de k_{fs} obtido pela solução da equação 5, o qual é uma estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado na condição unidimensional (Guimarães, 2000).

A solução numérica das equações 5 e 6 foi realizada com o auxílio do software GPM elaborado pelo Pesquisador Dr. Sidney Rosa Vieira, do Centro de Solos e Recursos Agroambientais do IAC.

Avaliou-se a resistência do solo à penetração por perfil penetrológico, utilizando-se de um penetrológico de molas marca Soil Control[®], modelo SC-60, com haste de 0,6 m de

comprimento e cone tipo B, segundo norma da ASAE-313. Concomitantemente, mediu-se o teor de água em cada ponto amostrado com o objetivo de caracterizar o estado hídrico no momento da avaliação da impedância do solo.

Determinou-se a densidade do solo a partir de amostras indeformadas coletadas com um amostrador de solos mecanizado, descrito por Teixeira (1998), e apresentado na Figura 4. Os monólitos de solo amostrados apresentavam 0,075 m de diâmetro e 0,60 m de comprimento.

Retiraram-se os monólitos das cápsulas, estes foram divididos em subamostras com 0,10 m de comprimento, constituindo um volume de $0,0075 \text{ m}^3$, e levados para uma estufa de circulação de ar forçada a 105°C durante 48 h.

3.4.3. Curva de retenção, porosidade total, macro e microporosidade, lâmina total de água disponível

A curva de retenção de água no solo foi obtida nos locais de instalação das baterias de tensiômetros, a partir das amostras indeformadas, coletadas em anéis volumétricos de 100 cm^3 até a profundidade de 0,60 m, em intervalos de 0,15 m, com três repetições por profundidade. Em todas as trincheiras, coletaram-se os anéis sempre na mesma parede, no sentido da pendente. As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Centro de Solos e Recursos Agroambientais do IAC. Com base nos resultados da curva de retenção, determinou-se a porosidade total, macro e microporosidade para essas mesmas profundidades.

A distinção entre macro e microporos é arbitrária (Reichardt, 1985). O critério adotado consistiu em assumir a porosidade total como a umidade volumétrica em porcentagem na saturação. A umidade volumétrica em porcentagem correspondente à tensão de 6 kPa foi arbitrada como a porcentagem de microporos do solo, sendo o resultado da diferença entre a porosidade total e a porcentagem de microporos aquele relativo à porcentagem de macroporos. Este critério tem sido recomendado em Embrapa (1997) e utilizado por vários autores (Stone & Silveira, 2001, Beutler et al. 2001, Souza et al., 2001, Guimarães, 2000, Carvalho et al., 1999, Maia, 1999, Lucarelli, 1997, Urchei et al., 1996, Albuquerque et al., 1995, Centurion & Dematte, 1992).



Foto cedida pelo Prof. Paulo Sergio Magalhães

Figura 4. Veículo amostrador de solos utilizado para a coleta de amostras indeformadas do solo e descrito em Texeira (1998).

A seguir, calculou-se a lâmina total de água disponível no solo, para as camadas das amostragens da curva de retenção, em cada tratamento, considerando-se a seguinte expressão:

$$LTD = \frac{(U_{cc} - U_{pm})}{10} D_s z \quad (7)$$

em que LTD é a lâmina total de água disponível no solo [mm], U_{cc} é a umidade em base peso na capacidade de campo [%], U_{pm} é a umidade em base peso no ponto de murcha [%], D_s é a densidade do solo [kg dm^{-3}], e z a profundidade da camada do solo amostrada para a curva de retenção [cm], adotada como 0,15 m.

As umidades na capacidade de campo e ponto de murcha corresponderam às tensões de 10 e 1.500 kPa, respectivamente, conforme recomendado por Reichardt (1988) para fins de irrigação.

3.5. Instalação e desenvolvimento do ensaio

Os sistemas de preparo do solo inicialmente selecionados para a análise do consumo de água e produção do feijoeiro foram o plantio direto, o sistema enxada rotativa e o sistema de preparo convencional com arado de disco. A seleção desses tratamentos deveu-se às diferenças verificadas na condutividade hidráulica saturada, profundidade da camada compactada, resistência do solo à penetração e perda de solos, desde 1990, de acordo com dados compilados e apresentados em Lucarelli (1997). Nesses tratamentos, realizaram-se, a partir de maio de 1999, os levantamentos das características físicas e hídricas do solo.

Encerrados os levantamentos preliminares, procedeu-se ao início das práticas agrícolas em 19 de agosto de 1999, com a aplicação do herbicida Zapp[®] (Sulfosate) na parcela do tratamento de preparo do solo plantio direto, numa dosagem de 14 l ha^{-1} , e 150 kg ha^{-1} de calcário em todas as parcelas. Devido às condições de solo seco, aplicou-se uma lâmina de água de 0,30 m em cada tratamento por meio de sistema de irrigação por aspersão, no período de 24 a 26 de agosto. No dia 27 de agosto, teve início o preparo do solo em toda a área experimental seguindo o procedimento descrito no item 3.1. da metodologia.

O plantio e a adubação foram realizados no dia 31 de agosto, com semeadora de precisão a um espaçamento de 0,50 m e um número médio de 13 sementes por metro linear, obtendo-se uma população final de aproximadamente 25 plantas m⁻² após a emergência, a qual ocorreu no dia 7 de setembro em todos os tratamentos.

Adubou-se na dosagem de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 10-10-10 no tratamento de sistema de preparo do solo rotavação e 200 kg ha⁻¹ nos demais tratamentos junto com a semeadura. Aos 38 dias após a emergência (DAE), 15 de outubro, aplicaram-se 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amônia 20%, de acordo com recomendação de Bulisani & Almeida (1990) e, aos 45 DAE, 1,5 l ha⁻¹ do adubo foliar CaB[®] (Cálcio 8,0% e Boro 2,0%)²

O controle das infestações por ervas daninhas foi realizado por meio da aplicação do herbicida Robust[®] (Fluazifop-P-Butil + Fomesafen) aos 8 DAE (15 de setembro) na concentração de 0,9 l ha⁻¹ e uma capina aos 23 DAE (30 de setembro).

Evitou-se a incidência de doenças, realizando-se, preventivamente, duas aplicações do fungicida Cercobin[®] 700 PM (Tiofanato Metílico) aos 17 e 48 DAE, 24 de setembro e 25 de outubro, respectivamente, na dosagem de 0,50 kg ha⁻¹. Além desses defensivos agrícolas, fez-se uma aplicação de 0,15 kg ha⁻¹ do inseticida Actara[®] (Thiamethoxam) aos 38 DAE (15 de outubro) para controle preventivo da mosca branca.

Apesar da emergência ter ocorrido ao mesmo tempo em todos os tratamentos, o sistema de preparo do solo plantio direto apresentou um desenvolvimento anormal e com sintomas de fitotoxicidade, tais como folhas amareladas e superbrotamento³. Esse fato levou a um segundo plantio em 30 de setembro, somente neste tratamento. Todavia, novamente os sintomas do primeiro cultivo voltaram a se manifestar.

Por esse motivo, substituiu-se o tratamento plantio direto pela parcela manejada com sistema de preparo do solo escarificador, a qual foi semeada na mesma data do ensaio e estava sendo submetida a um manejo de água semelhante ao das outras parcelas estudadas.

No tratamento escarificador, realizaram-se as determinações de curva de retenção macro e microporosidade, contudo, restaram as medidas de parâmetros físico-hídricos de solo

² Recomendação do Prof. Dr. Marco Antonio Galli do Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal – SP.

³ Diagnóstico realizado pelo Prof. André Luiz Paradela do Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal – SP.

determinados conforme a disposição em grid da Figura 3, as quais foram levantadas em julho de 2001, na mesma época em que se efetuaram os primeiros levantamentos. Como os procedimentos de manejo do solo permaneceram inalterados após o ciclo de 1999/2000, assumiu-se que as condições do solo mantiveram-se as mesmas em relação aquelas de 1999, para o tratamento escarificador.

O florescimento ocorreu aos 39 DAE (16 de outubro) em todos os tratamentos avaliados, tal como verificaram Medeiros et al. (2000) e Bulisani et al. (1987).

Encerrou-se o ensaio aos 81 DAE, 27 de novembro de 1999, procedendo-se, então, ao início da colheita no tratamento de sistema de preparo do solo rotavação. A colheita nos demais tratamentos ocorreu aos 85 DAE (1º de dezembro de 1999).

3.5.1. Bioensaio para avaliação de fitotoxicidade nas plantas do feijoeiro

Encerrado o experimento, realizou-se um bioensaio, durante o mês de janeiro de 2000, com o objetivo de avaliar se a causa do problema ocorrido com a cultura do feijoeiro teria sido a aplicação do herbicida Zapp antes da semeadura na parcela do plantio direto, única prática agrícola que diferiu em relação aos demais tratamentos.

Nesse bioensaio, semeou-se a cultura do feijoeiro em dezesseis vasos, sendo oito deles preenchidos com o solo retirado da superfície da parcela manejada com o sistema de preparo arado de disco, e o restante com solo proveniente da parcela com plantio direto. Aplicou-se o herbicida Zapp na dosagem utilizada no experimento, 14 l ha^{-1} , em quatro vasos de cada tratamento, no restante, não houve aplicação de nenhum produto⁴.

Observou-se que em todos os vasos preenchidos com o solo da parcela arado de disco, a cultura desenvolveu-se sem apresentar nenhum sintoma de fitotoxicidade, enquanto em todos os vasos com solo proveniente da parcela plantio direto, com ou sem aplicação do herbicida antes do plantio, a cultura revelou os mesmos problemas anteriormente observados no campo.

Concluiu-se, portanto, que a cultura semeada na parcela com o sistema de preparo plantio direto sofreu a influência de algum produto aplicado no solo em ciclos anteriores

⁴ Orientação dada pelo Prof. Dr. Luiz Lonardon Foloni, credenciado junto ao curso de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

afetando o desenvolvimento normal da cultura do feijoeiro, a qual foi, pela primeira vez, semeada nas parcelas experimentais da FEAGRI.

3.6. Sistema e manejo de irrigação

No presente trabalho, o enfoque principal foi a influência do sistema de preparo e manejo do solo sobre o consumo de água do feijoeiro. Um dos fatores que afetam a produção é a uniformidade de aplicação de água do sistema de irrigação (Bresler & Dagan, 1988). Por esse motivo, escolheu-se um sistema de irrigação localizada por não sofrer redução de sua uniformidade devido à ação do vento e por eliminar a influência da interceptação de água pela cultura no balanço hídrico.

O sistema de irrigação por gotejamento foi instalado em todas as parcelas, com exceção do tratamento roçado, no dia 22 de setembro. Utilizou-se o tubo gotejador Streamline SL 80, da Netafim®, com diâmetro interno de 0,0159 m, gotejadores espaçados em 0,3 m e vazão de 1,49 l h⁻¹ para uma pressão de serviço de 8,5 mca. Instalou-se uma linha de tubo gotejador de 20 m por linha de cultura, perfazendo um total de 60 tubos gotejadores por parcela espaçados de 0,50 m.

Foram estimados o coeficiente de uniformidade de aplicação de água e a lâmina média segundo metodologia descrita por Bralts & Edwards (1986). O coeficiente de uniformidade foi de 91% e a vazão média do gotejador, 1,06 l h⁻¹, o que corresponde a uma lâmina média de 7,1 mm h⁻¹. Esse valor de vazão, um pouco abaixo daquele divulgado pelo fabricante, deveu-se a um regulador de pressão de 7 mca colocado antes da linha de derivação em cada talhão, em função de a pressão na entrada das parcelas, observada por meio de manômetros, ter-se apresentado superior a 30 mca durante todas as irrigações ao longo do ciclo.

O manejo nas parcelas correspondentes aos sistemas de preparo do solo rotavação, convencional com arado de disco e escarificador consistiu em irrigar de forma a impedir que a tensão de água no solo, controlada por tensiômetros, excedesse a um valor de 50 kPa a 0,15 m de profundidade, segundo recomendação de alguns autores para essa cultura no Estado de São Paulo (Pires et al., 1991; Libardi & Saad, 1994). A quantidade aplicada elevou a umidade no perfil até a capacidade de campo.

No tratamento alternado, procedeu-se a um manejo de irrigação para manter a cultura sob potenciais de água no solo em torno de 10 kPa, a partir de 30 de setembro. Esse tratamento foi utilizado como referência para inferir sobre as condições hídricas das plantas dos outros tratamentos, verificando-se a temperatura do dossel, medida com termômetro infravermelho.

A frente de molhamento foi monitorada por tensiômetros instalados nas seguintes profundidades: 0,15, 0,30 e 0,50 m. Nos sistemas de preparo do solo rotavação e convencional com arado de disco, instalaram-se três baterias de tensiômetros por parcela e três repetições por profundidade. No tratamento escarificador, instalaram-se duas baterias e, no sistema alternado, uma bateria de tensiômetros.

As leituras de tensão de água no solo foram efetuadas com tensímetro digital de punção, cujo funcionamento foi descrito por Marthaler et al. (1983).

3.7. Balanço hídrico de campo

3.7.1. Armazenamento da água no solo

A variação do armazenamento de água no solo, até a profundidade de 0,50 m, foi determinada a partir dos perfis consecutivos de umidade, obtida entre duas irrigações, ao longo do ciclo do feijoeiro.

Determinou-se a umidade do solo por meio do método gravimétrico, com base em amostras de solo coletadas com trado em intervalos de profundidades de 0,1 m, desde a superfície até 0,50 m, com três repetições casualizadas por tratamento e a 0,1 m da linha de cultura.

Após a coleta, as amostras eram acondicionadas em latas de alumínio e secas em estufas à 105 °C por 48 horas.

A estimativa do armazenamento de água no solo (A) foi realizada por:

$$A = \bar{\theta} \Delta z \quad (8)$$

onde, $\bar{\theta}$ é a umidade média do perfil do solo [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$].

A variação de armazenamento (ΔA) num intervalo de tempo $\Delta t = t_1 - t_0$ foi determinada por:

$$\Delta A = A_1 - A_0 \quad (9)$$

onde, A_0 , A_1 são o armazenamento de água no solo nos tempos considerados (mm).

3.7.2. Drenagem profunda

O termo drenagem profunda foi determinado pela equação de Darcy (Reichardt, 1985):

$$D_s = -k(\theta) \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (10)$$

onde, D_s é a densidade de fluxo de água [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$], $k(\theta)$ a condutividade hidráulica do solo, e $\Delta H \Delta z^{-1}$ o gradiente de potencial [cm cm^{-1}]

A condutividade hidráulica do solo $k(\theta)$ em função de sua umidade em base volume (θ) foi determinada pela equação desenvolvida por Van Genuchten (1980), na qual o autor relaciona condutividade hidráulica relativa, k_r , à curva característica de água no solo, com base no modelo de Mualen (1976).

Para o cálculo de $k(\theta)$, foi utilizado o programa desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). O procedimento inclui o ajuste de curvas entre a umidade do solo (θ) e o potencial matricial h , conforme a seguinte equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (11)$$

onde, θ é a umidade volumétrica do solo [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]; ψ é o módulo do potencial matricial correspondente à umidade volumétrica θ [cm de água]; θ_s é a umidade volumétrica do solo na saturação [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]; θ_r é a umidade volumétrica residual correspondente ao potencial de 15.000 cm de água [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]; e α , m , n são parâmetros do solo obtidos através de regressão não linear.

A condutividade hidráulica relativa foi calculada por:

$$k_r = W^{0,5} \left(1 - \left(1 - W^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (12)$$

onde W é uma unidade adimensional, dada pela equação:

$$W = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_o - \theta_r)} \quad (13)$$

sendo m, n, θ_r e θ_o os mesmos parâmetros estimados pelo modelo de Van Genutchen (1980).

A condutividade hidráulica do solo, $k(\theta)$, é finalmente calculada pela seguinte expressão:

$$k(\theta) = k_r k_{fs} \quad (14)$$

A condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) a 0,40 m de profundidade foi estimada por meio do permeâmetro de Guelph, resolvendo a equação 5 conforme metodologia descrita no item 3.4.2 e realizando-se 11 repetições por tratamento.

O gradiente hidráulico foi monitorado por baterias de tensiômetros a 0,3 e 0,5 m de profundidade.

O manejo de água adotado foi conservativo, com aplicação controlada, o que possibilitou o uso do modelo de Van Genutchen (1980) para a estimativa da drenagem profunda.

3.7.3. Evapotranspiração

Esse parâmetro foi estimado pela técnica do balanço hídrico de campo, cuja forma simplificada para uma camada de profundidade z e um intervalo de tempo Δt é descrita por Reichardt (1985), como:

$$P + I \pm Ds - Qe - ET = \Delta A \quad (15)$$

onde, P é a precipitação [mm]; I a irrigação [mm]; Ds a drenagem profunda [mm]; Qe o escoamento superficial [mm]; ET a evapotranspiração [mm]; ΔA a variação de armazenamento de água no solo [mm].

No cálculo de ET, nas condições de campo, o balanço hídrico foi realizado num volume de controle de 0,40 m de profundidade, já que vários autores encontraram mais de 90% das raízes do feijoeiro concentrando-se nessa camada (Pires et al., 1991, Stone & Pereira, 1994, Wutke et al., 2000, entre outros).

3.8. Condições hídricas da planta

A temperatura do dossel vegetativo da cultura foi monitorada por meio de um termômetro de radiação infravermelha, modelo 112.2L, fabricado pela Everest Interscience Inc, operando na faixa de temperatura de -30 a 110° C e 0,1° C de resolução.

Tomaram-se dez leituras por ponto e cinco pontos para cada tratamento de sistema de preparo do solo avaliado, a uma altura de 0,5 m acima do topo do dossel da cultura. O ângulo de visada foi perpendicular à superfície do solo levando a uma área de medição da temperatura correspondente a um círculo de 0,1 m de diâmetro. O coeficiente de emissividade foi fixado em 0,99 para as medidas realizadas ao longo de todo o ciclo.

As leituras foram efetuadas diariamente entre 12h e 15h, a partir de 1° de outubro, quando a porcentagem de cobertura vegetal variou de 31 a 40%. Nesse momento, a copa da cultura ocupava uma faixa de aproximadamente 0,2 m de largura, e o termômetro foi apontado no meio da linha para que a área de temperatura medida fosse composta somente pelas folhas do dossel vegetativo.

As temperaturas medidas nos tratamentos de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa foram comparadas com a temperatura média do ar obtidas no momento das medições na estação meteorológica da FEAGRI. Considerando-se essa comparação, calculou-se o índice de estresse hídrico diário por meio da seguinte equação (Idso et al., 1977 e Jackson et al., 1977):

$$IEHD = (T_{MC} - T_{MA}) \quad (16)$$

onde, T_{MC} é a temperatura média da cobertura vegetal [°C] e T_{MA} , a temperatura média do ar [°C].

As temperaturas medidas nos tratamentos de sistema de preparo do solo selecionados foram também comparadas àquelas do tratamento alternado, onde a cultura foi irrigada de forma a manter altos potenciais de água no solo, próximos à capacidade de campo, servindo como referência para a indicação do estresse hídrico da cultura nos demais talhões monitorados. O cálculo do índice de estresse hídrico (TSD) teve como base a comparação entre essas temperaturas pela seguinte equação (Clawson & Blad, 1982):

$$TSD = (T_{MC} - T_{MALT}) \quad (17)$$

onde, T_{MC} é a temperatura média da cobertura vegetal [°C] e T_{MALT} a temperatura média do tratamento alternado [°C].

3.9. Parâmetros de desenvolvimento da planta

Monitorou-se o crescimento da cultura, tomando-se medidas de planta relacionadas à matéria seca da parte aérea, altura acima da superfície do solo, porcentagem de cobertura vegetal e índice de área foliar, em uma frequência de amostragem que, no início, era semanal, passando a quinzenal no final do ciclo da cultura. A medição do índice de área foliar foi realizada por meio do medidor Li-Cor® LI 3000, com 0,01 cm² de precisão, o qual consiste num método destrutivo.

Coletaram-se amostras de plantas em uma extensão de 0,5 m de rua, perfazendo um total de seis amostras por parcela para cada tratamento.

Utilizou-se o método da fotografia, descrito por Arruda (1984), para a determinação da cobertura vegetal da cultura do feijoeiro, tomando-se seis fotografias por tratamento.

As medições foram realizadas para intervalos de tempo que variaram de cinco a sete dias durante a fase de desenvolvimento da cultura, e de quinze dias quando a cultura recobriu

totalmente o solo. No final do ciclo, voltou-se a utilizar um intervalo de sete dias por ser o mais adequado na fase de senescência da cultura.

As medidas de altura acima da superfície do solo foram realizadas em dez plantas ao longo de uma extensão de 1,5 m, em cinco locais por tratamento, totalizando 50 plantas em cada ciclo de amostragem por sistema de preparo do solo.

3.10. Sistema radicular da cultura

Na avaliação do sistema radicular, as amostras foram retiradas na época da florada no período de 44 a 45 DAE, ou 21 a 22 de outubro, respectivamente, utilizando-se de um trado tipo caneca de bordo serrilhado, com 0,07 m de diâmetro, conforme descrito por Fujiwara et al. (1994).

As amostragens foram realizadas a 0,10 m da linha da cultura, de 0,1 em 0,1 m, até 0,6 m de profundidade, com seis repetições por tratamento⁵ nos sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e rotavação.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, às quais adicionou-se uma solução alcoólica a 5%. A separação das raízes foi realizada no Centro de Ecofisiologia e Biofísica do IAC, utilizando-se do método de Gottingen (Böhm, 1979), o qual consiste de lavagens sucessivas do material, com auxílio de uma peneira de malha de 0,1 mm de abertura. As impurezas do solo, a matéria orgânica e as raízes mortas foram retiradas manualmente, com auxílio de uma pinça. Posteriormente, as raízes foram colocadas para secagem em estufa a 70° C, até peso constante.

3.11. Produção final

A produção e suas componentes foram analisadas a partir de amostras colhidas em seis subparcelas por tratamento. Cada subparcela possuía uma área de 9 m², tamanho esse utilizado por outros autores para análise da produção final do feijoeiro (Medeiros et al., 2001; Stone &

⁵ Recomendação dada pela Pesquisadora Dra. Regina Célia Matos Pires do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do IAC.

Silveira, 1999; Wutke et al., 2000). As componentes determinadas foram: número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso seco de 1000 sementes, produção de grãos, matéria seca total e índice de colheita.

3.12. Metodologia estatística para análise dos dados

3.12.1. Variáveis analisadas estatisticamente

3.12.1.1. Propriedades físico-hídricas para os quatro sistemas de preparo do solo

Na amostra de 40 pontos sob quatro sistemas de preparo de solo (escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa), independentes entre si, foram observadas as seguintes propriedades de solo:

- Densidade do solo em quatro profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m);
- Umidade volumétrica em quatro profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m);
- Densidade de partículas entre 0 a 0,20 m;
- Porosidade total entre 0 e 0,20 m ;
- Condutividade hidráulica saturada e infiltração básica a 0,15 m.
- Textura (argila, silte total, areia fina, areia grossa) entre 0 e 0,20 m;
- Resistência do solo à penetração em dez profundidades (0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45 e 0,50 m);

Além dessas, realizou-se inferência estatística para a variável condutividade hidráulica saturada a 0,40 m em uma amostra aleatória de onze pontos sob três sistemas de preparo de solo (escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa), porosidade total do solo, macroporosidade, microporosidade e lâmina total de água disponível nas camadas de solo de 0 a 0,15; 0,15 a 0,30; 0,30 a 0,45 e 0,45 a 0,60 m, em amostras de três pontos por profundidade em cada trincheira e três trincheiras por tratamento (escarificador, plantio direto, convencional com arado de disco e enxada rotativa), resistência do solo à penetração, na época

da colheita, em dez profundidades, em amostras de seis pontos por tratamento (escarificador, convencional com arado de disco e rotavação).

3.12.1.2. Desenvolvimento da cultura, produção e suas componentes.

Compararam-se as médias dos seguintes parâmetros, nas correspondentes épocas de amostragem:

a) ao longo do ciclo:

- *Altura das plantas* do feijoeiro observadas a 17, 24, 32, 36, 41, 45, 52, 65, 72 e 76 dias após a emergência (DAE);

b) no florescimento

- *Densidade de raízes* do feijoeiro a 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m de profundidade com seis repetições por sistema de preparo do solo e profundidade;

- *Desenvolvimento da parte aérea da planta*: índice de área foliar, matéria seca total por área, matéria seca total por planta e número de trifólios por planta com seis repetições por sistema de preparo do solo;

c) após a colheita

- *Produção e suas componentes*: Índice de colheita, peso seco de 1.000 sementes, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, matéria seca por área, matéria seca por planta, matéria seca de grãos por área, matéria seca de grãos por planta e produção final com seis repetições por sistema de preparo do solo em parcelas de 1,5 m².

3.12.2. Estatísticas descritivas e teste da normalidade das variáveis

Na análise da estatística descritiva, determinaram-se as medidas de tendência central, posição e dispersão (Triola, 1999) de cada variável por profundidade dentro dos sistemas de preparo de solo pela média aritmética, desvio-padrão, coeficiente de variação, mediana, 1.º quartil (Q₁), 3.º quartil (Q₃), amplitude interquartilica ($d=Q_3-Q_1$) e limites extremos inferior ($Q_1 - 1,5 d$) e superior ($Q_3 + 1,5 d$).

O coeficiente de variação, por ser uma medida que permite a comparação entre duas ou mais variáveis, independentemente de suas unidades, tem sido recomendada para estudos da variabilidade relativa de diversas propriedades do solo por Warrick (1998). Esse autor

classifica a variabilidade das propriedades do solo nos seguintes níveis: baixa, para valores de CV menores do que 15%; média, para valores de CV entre 15 e 50% e alta, para CV acima de 50%.

Além disso, verificou-se a normalidade da variável por sistema de preparo de solo e profundidade por meio do teste de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), ao nível de significância $\alpha = 0,05$, utilizando-se o software Statistical Analysis Systems - SAS® (SAS, 1982, SAS, 1986).

O Box-plot (Tukey, 1977), reúne num mesmo gráfico as informações sobre a variabilidade dos dados e assimetria da sua distribuição, localização da média, 1.º quartil e 3.º quartil. Utilizou-se, neste trabalho, de tal gráfico para representar essas análises por sistema de preparo de solo e profundidade.

3.12.3. Comparações entre médias para os sistemas de preparo de solo

Para comparar os sistemas de preparo do solo sobre as variáveis levantadas, dividiu-se o estudo nas seguintes etapas:

- a) Aplicação da análise de variância multivariada (MANOVA) para as variáveis amostradas nas mesmas unidades experimentais:
 - *Parâmetros físico-hídricos do solo*: densidade de partículas, porosidade total e textura (argila, silte, areia fina, areia grossa), condutividade hidráulica saturada e infiltração básica, entre 0 e 0,20 m de profundidade ;
 - *Parâmetros de desenvolvimento de planta na época do florescimento*: índice de área foliar, matéria seca total, matéria seca total por planta e número de trifólios por planta;
 - *Produção e suas componentes*: Índice de colheita, matéria seca de 1.000 sementes, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, matéria seca por área, matéria seca por planta, matéria seca por grão, matéria seca por planta e produção final.
- b) Aplicação da análise de variância multivariada (MANOVA) com medidas repetidas (profundidades e altura) dentro do sistema de preparo do solo para:

- Resistência do solo à penetração em dez profundidades com quarenta repetições (0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45 e 0,50 m);
- Densidade do solo em quatro profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m);
- Umidade volumétrica em quatro profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m);
- Macroporosidade, microporosidade, porosidade total, lâmina total de água disponível em quatro profundidades (0-0,15; 0,15-0,30; 0,30-0,45 e 0,45-0,60 m);
- Alturas das plantas do feijoeiro observadas a 17, 24, 32, 36, 41, 45, 52, 65, 72 e 76 dias após a emergência (DAE);
- Densidade de raízes da planta do feijoeiro 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m de profundidade com seis repetições por SPS *versus* profundidade;

No estudo das variáveis levantadas em uma mesma unidade experimental, testam-se as diferenças entre sistemas de preparo do solo considerando a correlação entre elas. Na rejeição da hipótese de nulidade (não há efeitos entre sistemas de preparo do solo) pela MANOVA, assegura-se pelo teste de Wilks que diferenças entre efeitos de SPS ocorrem em pelo menos alguma das variáveis analisadas. Nesse caso, é aconselhável fazer um teste F antes de efetuarem-se as comparações múltiplas entre média de tratamentos. Essas diferenças comprovam as significâncias obtidas na análise de variância univariada (ANOVA) e, portanto, podem ser evidenciadas pelo teste de comparações múltiplas para um nível de significância $p < \alpha/k$ (k =número de variáveis, $\alpha=0,05$). Entretanto, se a MANOVA (Johnson, 1988) não mostra diferenças significativas, realizar análises estatísticas univariadas é extremamente perigoso, porque diferenças que parecem ocorrer, não são reais; isto é, essas diferenças poderiam ocorrer sobretudo de forma casual.

Neste trabalho, utiliza-se o teste de diferenças mínimas significativas ou dms, pois as comparações entre pares de médias adequam-se a comparações de efeitos entre amostras aleatórias retiradas de populações independentes depois das confirmações efetuadas pela MANOVA ou mesmo pela ANOVA com níveis de significância consideravelmente baixos,

não acarretando em perda do poder do teste. A diferença mínima significativa (dms) a 5% de probabilidade é obtida por $dms = t_{v,5\%} s_d$, sendo $t_{v,5\%}$ o valor de “t” de Student tabelado com v graus de liberdade de erro, $s_d = (2.qmr.(r)^{-1})^{0,5}$ (qmr é o quadrado médio do erro e r o número de observações por média). Para que duas médias (m_1 e m_2) sejam diferentes ao nível de significância de 5%, a diferença entre elas deve exceder a dms, ou seja, $m_1 - m_2 > dms$.

4. Resultados e Discussão

4.1. Manejo de irrigação, tensão de água no solo e condições hídricas da planta

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam as lâminas de irrigação aplicadas, a variação de tensão de água no solo, medidas nas profundidades 0,15; 0,30 e 0,50 m, e a evolução da temperatura do dossel vegetativo, ao longo do ciclo, medidos nas parcelas experimentais correspondentes aos tratamentos alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa. O manejo adotado visou à aplicação controlada a fim de minimizar a perda de água por drenagem profunda nos três últimos tratamentos citados.

Foram nove irrigações ao longo do ciclo, acumulando um valor de 251, 258 e 232 mm para os tratamentos de sistema de preparo do solo escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa respectivamente. No tratamento alternado, aplicaram-se onze irrigações durante todo o ensaio, totalizando 302 mm.

As quantidades foram calculadas com base na demanda evaporativa da atmosfera, na observação da frente de molhamento do solo, e na intensidade média de aplicação de água fornecida pelo sistema.

Procurou-se realizar as regas num intervalo semanal, mantendo-se, porém, um controle do potencial matricial do solo por meio de tensiômetros. Verificou-se, ainda, como medida auxiliar do manejo, a manifestação de sintomas visuais de seca, como a mudança de coloração ou a maior ocorrência de paraclitropismo, pois este é um movimento típico apresentado por várias leguminosas para escapar dos períodos de estresse hídrico (Berg & Hsiao, 1986).

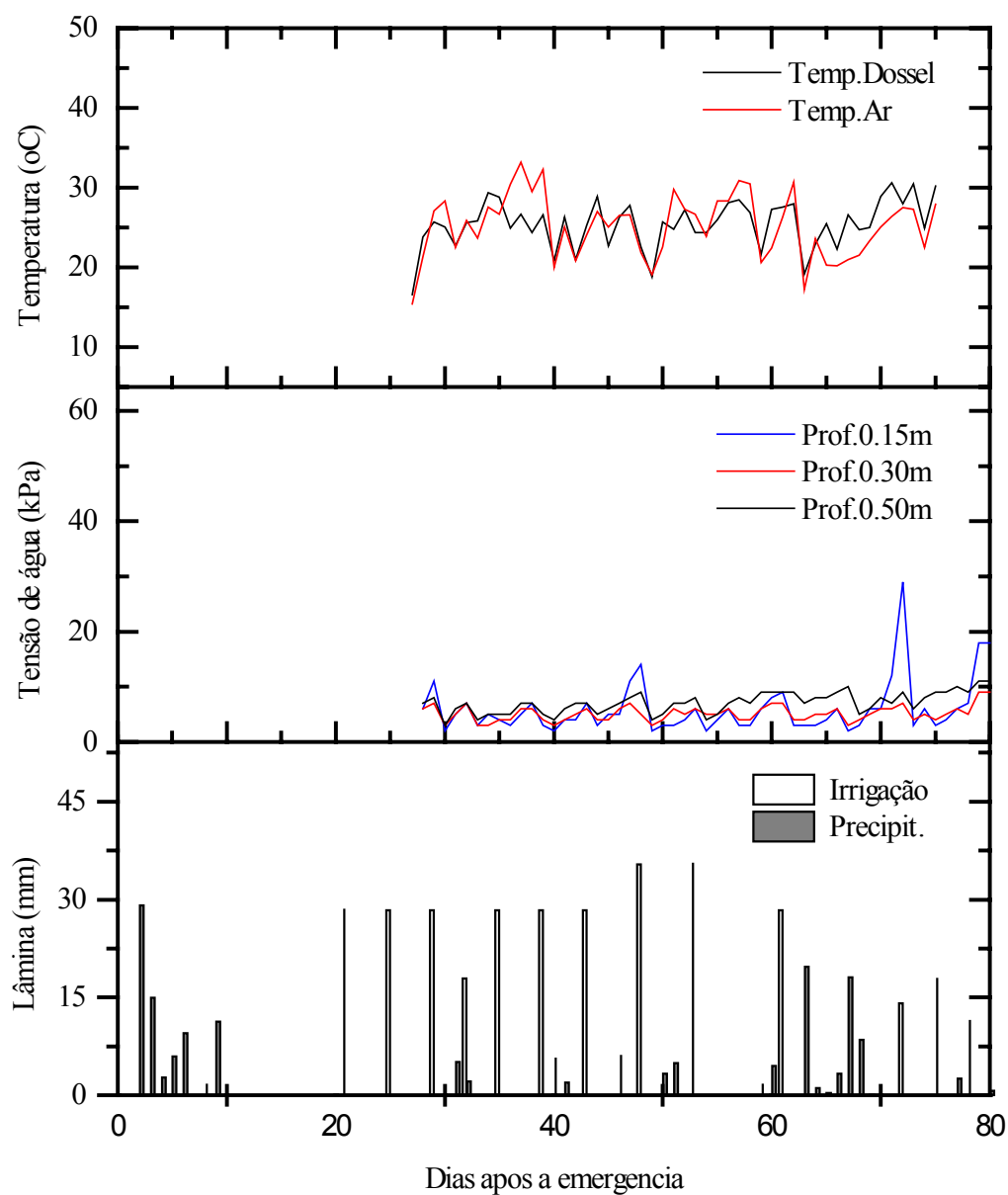


Figura 5. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo alternado, em Campinas – SP, no ano de 1999.

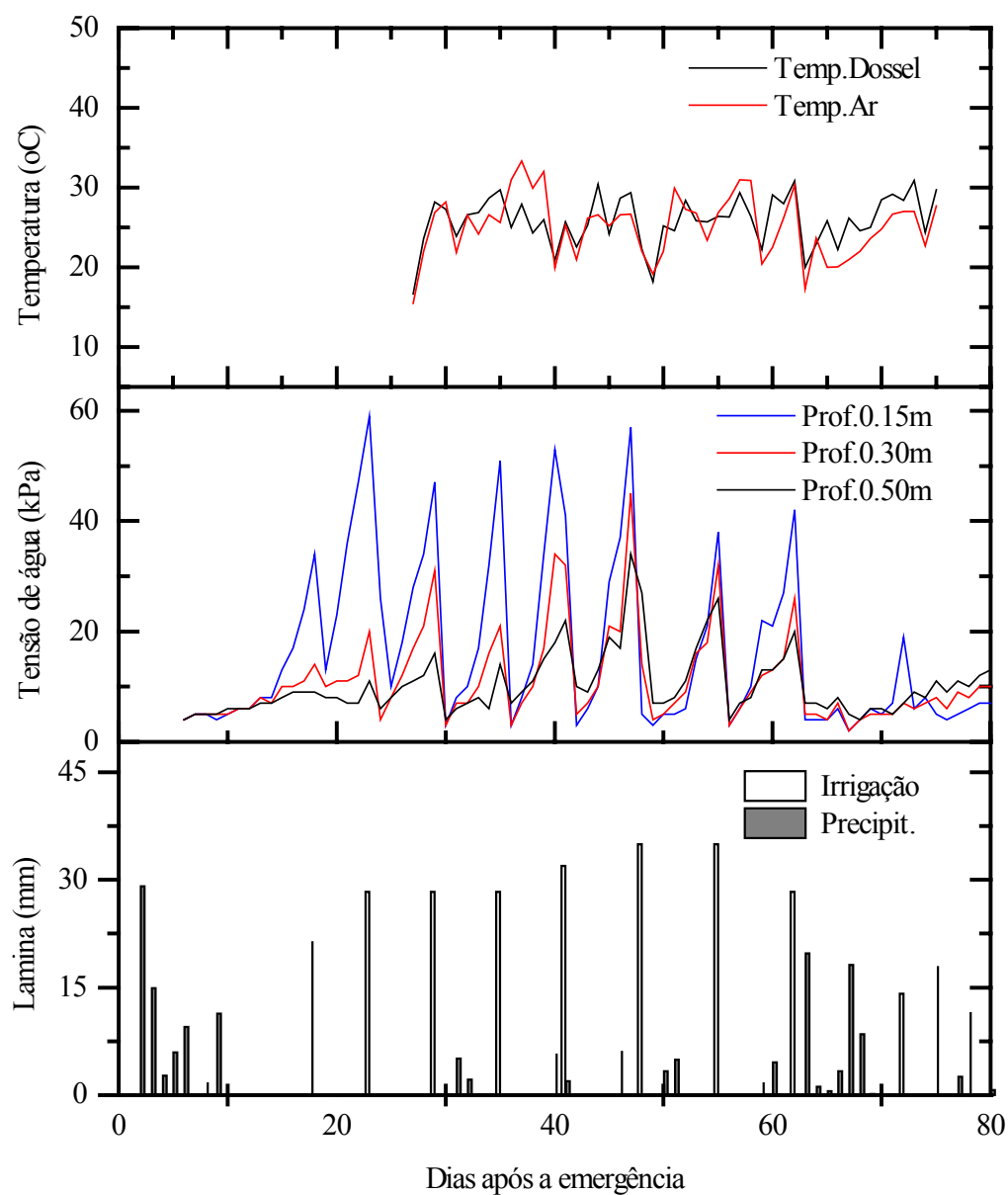


Figura 6. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo escarificador, em Campinas – SP, no ano de 1999.

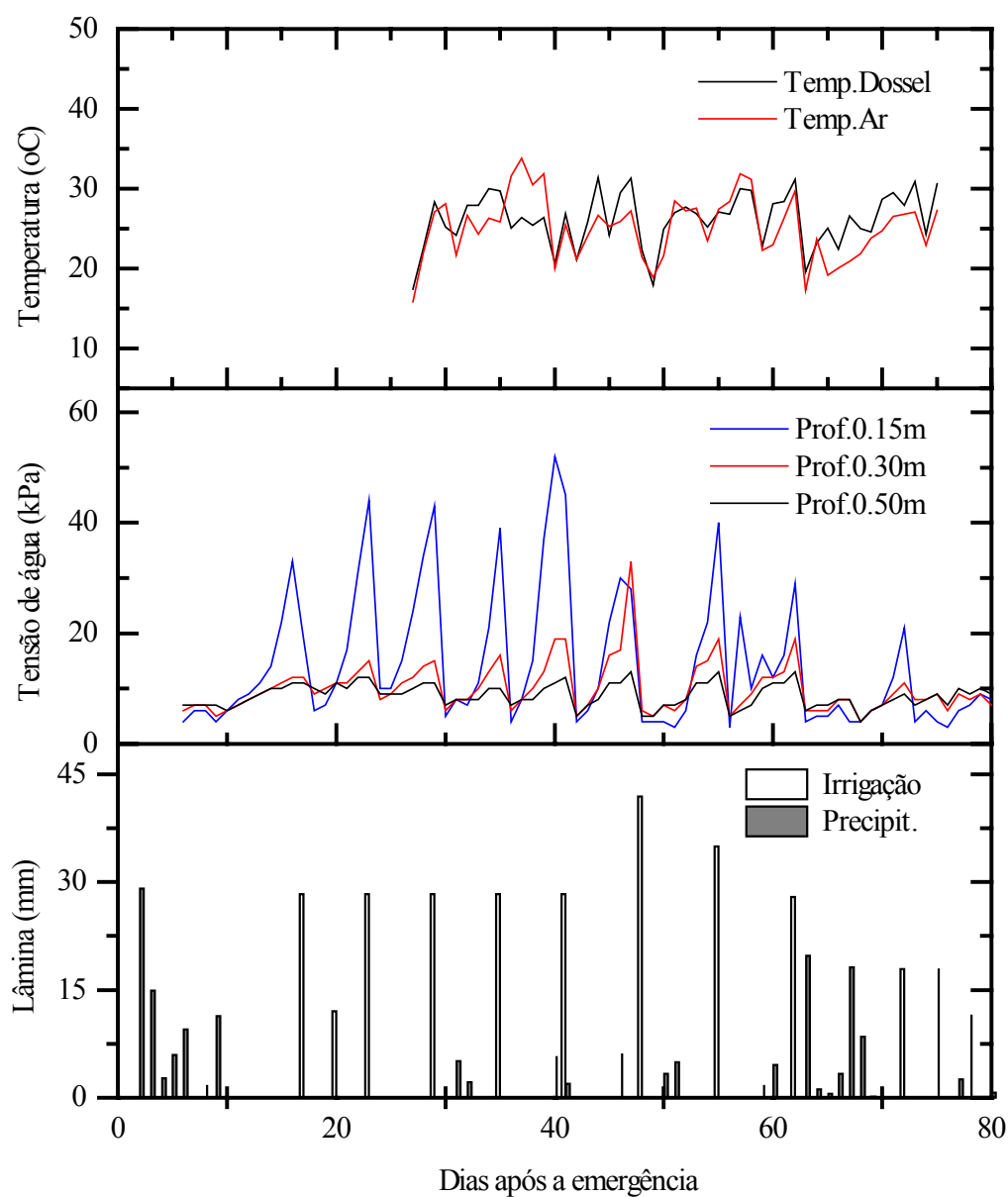


Figura 7. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo convencional com arado de disco, em Campinas – SP, no ano de 1999.

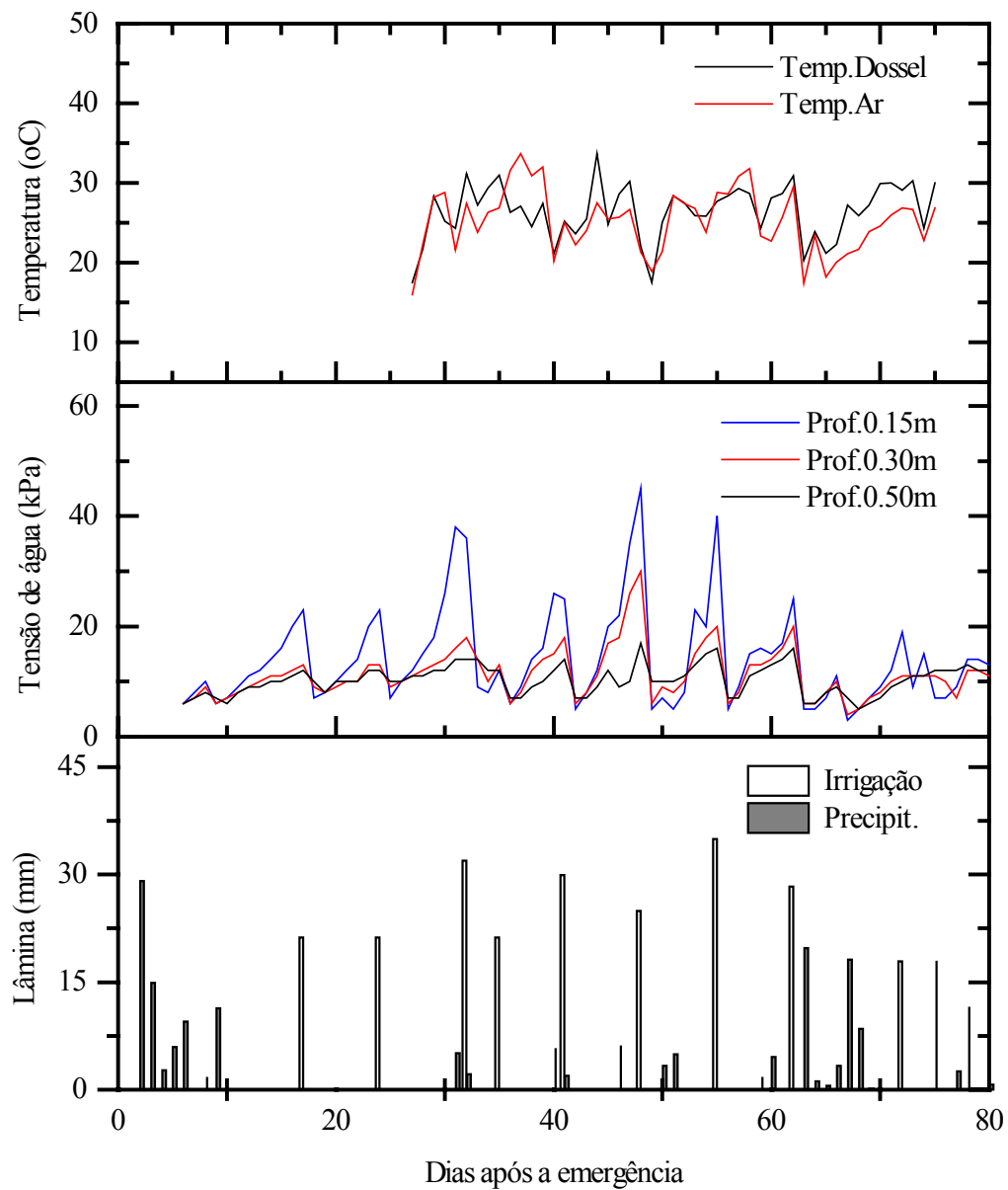


Figura 8. Lâminas de irrigação, variação de tensão de água no solo e evolução da temperatura do dossel do feijoeiro irrigado, medidos na parcela correspondente ao sistema de preparo enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

A tensão média de água no solo na profundidade utilizada para o manejo de irrigação (0,15 m) foi de 17 kPa para o sistema de preparo do solo escarificador e de 14 kPa para os tratamentos convencional com arado de disco e enxada rotativa no período de 6 a 81 DAE (13 de setembro a 27 de novembro de 2001).

O maior valor médio de tensão de água no solo a 0,15 m de profundidade, para um período de dois dias, ocorreu em épocas distintas em todos os tratamentos.

Para os tratamentos enxada rotativa e arado de disco, as máximas tensões médias de água no solo atingiram 40 e 49 kPa respectivamente. As épocas de ocorrência desses valores foram no período de 47 a 48 DAE (24 a 25 de outubro) para o tratamento enxada rotativa, durante o pleno florescimento; e 40 a 41 DAE (17 a 18 de outubro) para o sistema de preparo convencional arado de disco, no início do florescimento.

No sistema de preparo escarificador, observou-se a maior tensão média a 0,15 m, para um intervalo de dois dias, dentre todos os tratamentos, atingindo 54 kPa no período de 29 a 30 DAE (6 a 7 de outubro), durante a fase de desenvolvimento da cultura. O segundo valor mais elevado foi de 47 kPa, o qual ocorreu em dois momentos: entre 40 e 41 DAE, e de 46 a 47 DAE (23 a 24 de outubro), coincidindo com época de ocorrência dos outros dois tratamentos citados.

A partir desses resultados, observa-se que a tensão de água no solo esteve abaixo do valor de tensão adotado para o manejo da água no feijoeiro (50 kPa) a 0,15 m, durante o ensaio, para todos os tratamentos.

No tratamento alternado, o potencial matricial médio, no período de 28 a 81 DAE (5 de outubro a 27 de novembro) foi de -6 kPa para as três profundidades avaliadas. Na profundidade de 0,15 m o menor valor médio de potencial matricial registrado foi de -18 kPa durante o período de 80 a 81 DAE, no final do ciclo e próximo ao momento da colheita.

Nas profundidades de 0,30 e 0,50 m, utilizadas para o cálculo do gradiente do potencial matricial aplicado ao balanço hídrico, observaram-se os valores médios de -11 e -10 kPa, respectivamente, para os tratamentos escarificador e enxada rotativa, enquanto no tratamento arado de disco, esses valores foram -10 e -9 kPa para as respectivas profundidades citadas.

A época de ocorrência dos maiores valores de tensão de água no solo nas profundidades de 0,30 e 0,50 m foi semelhante para os tratamentos com o mesmo manejo de irrigação, ou seja, de 47 a 48 DAE. Durante esse período, o índice de área foliar estava atingindo o seu máximo valor para os três tratamentos como será discutido no capítulo de desenvolvimento de cultura.

O tratamento escarificador apresentou os seus maiores valores tensão de água no solo de 45 e 34 kPa nas profundidades de 0,30 e 0,50 m respectivamente, enquanto os tratamentos convencionais com arado de disco e enxada rotativa alcançaram, para essas mesmas profundidades, o máximo de 33 e 13 kPa e de 30 e 17 kPa respectivamente. Isto indica uma maior eficiência do sistema radicular com exploração mais profunda da água no sistema de preparo escarificador, em comparação aos tratamentos convencional com arado de disco e enxada rotativa, o que pode ser corroborado pela distribuição de raízes observada e discutida mais adiante.

As Figuras 9 e 10 apresentam a evolução dos valores acumulados dos índices utilizados para a avaliação do déficit hídrico do feijoeiro a partir da temperatura da cobertura vegetal: o primeiro com base nas diferenças de temperatura entre o ar e a cobertura vegetal (IEHD), e o segundo (TSD), nas diferenças de temperatura da cobertura vegetal medida nas parcelas escarificador, arado de disco e enxada rotativa e uma área irrigada de forma a manter o potencial matricial em níveis próximos à capacidade de campo, neste trabalho representada pela parcela com sistema de preparo alternado.

Os maiores valores encontrados de IEHD foram de 5,5 °C, aos 69 DAE, 6,6 °C, aos 60 DAE, 5,9 °C, aos 66 DAE, e 6,1 °C, aos 68 DAE, para os tratamentos alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa respectivamente.

Após os 60 DAE, há um crescimento do IEHD para todos os tratamentos, conforme pode ser observado na Figura 9, não coincidindo, todavia, com os períodos em que se observaram os maiores valores de tensão de água no solo. Contudo, no período de 61 a 68 DAE foi realizada uma irrigação de 28,4 mm em todos os tratamentos e as chuvas acumularam 50 mm, conseqüentemente o aumento da temperatura do dossel em relação à temperatura do ar deve ter provavelmente ocorrido pelo início da senescência.

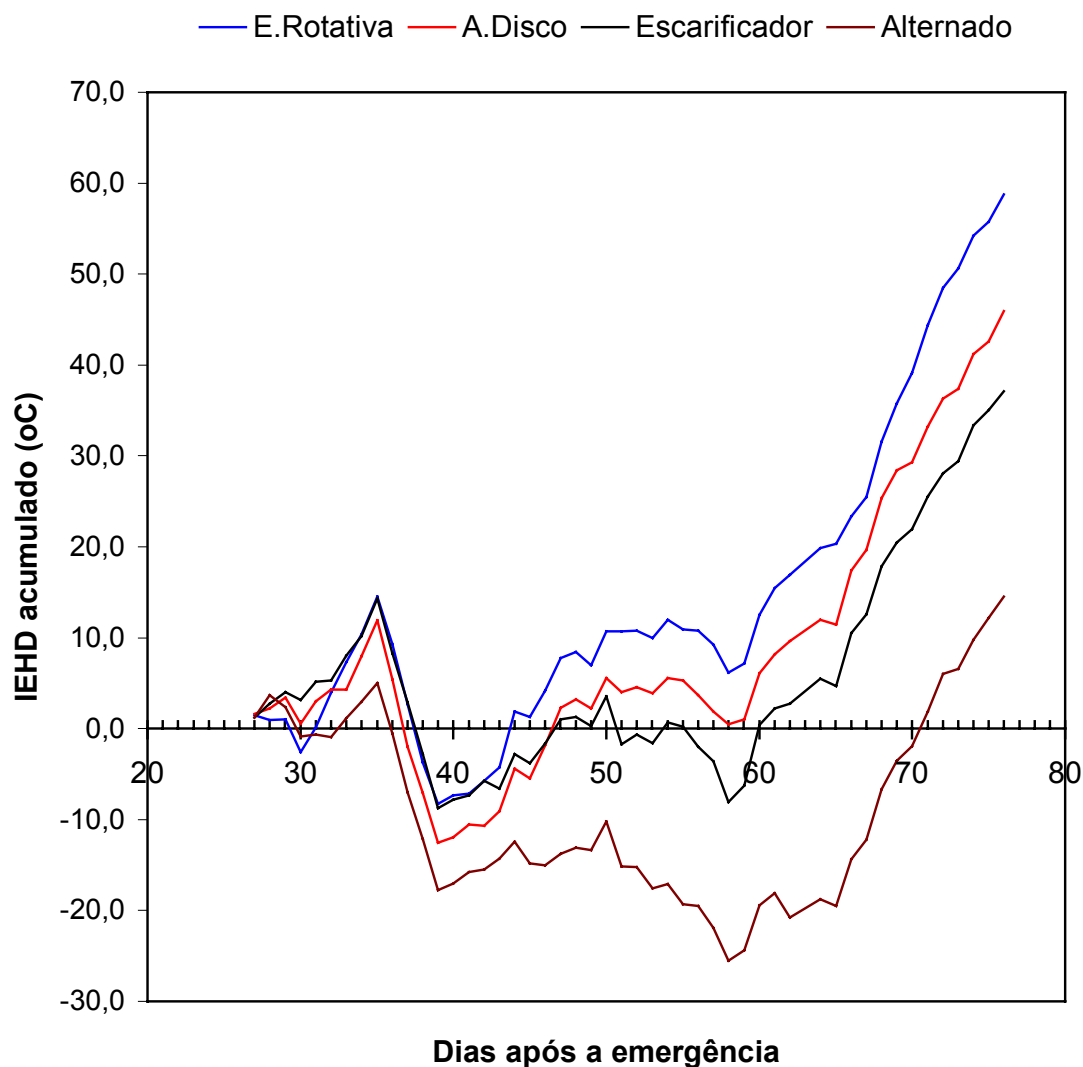


Figura 9. Índice de estresse hídrico acumulado (IEHD) do feijoeiro irrigado, calculado com base na diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar, ao longo do ciclo, para os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

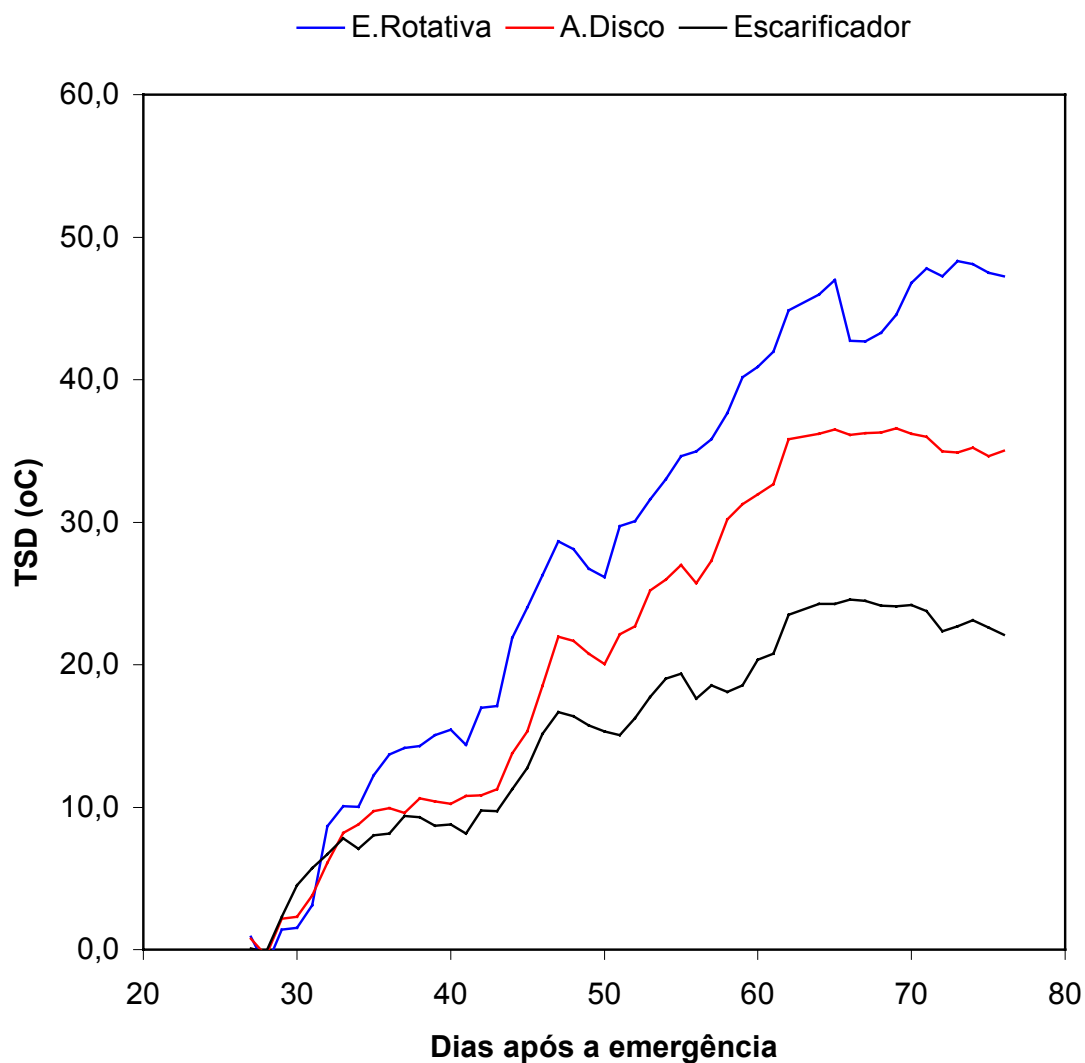


Figura 10. Índice de estresse hídrico acumulado (TSD) do feijoeiro irrigado, calculado com base na diferença entre a temperatura do dossel e de uma cultura bem irrigada, ao longo do ciclo, para os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Na fase da senescência ocorre uma elevação da resistência estomática, como observado por Medeiros et al. (2000), levando ao aumento da temperatura do dossel.

Os valores acumulados de IEHD ao final do ciclo foram de 14,5; 37,1; 45,9 e 58,8 °C, respectivamente, para os tratamentos alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa. Esses resultados demonstram o efeito do manejo diferenciado de água do tratamento alternado, que revelou o menor valor acumulado de IEHD, em relação aos demais.

Os maiores valores encontrados de TSD foram de 2,7 °C, aos 62 DAE, 3,5 °C aos 47 DAE, e 5,5 °C aos 32 DAE para os tratamentos escarificador, arado de disco e enxada rotativa respectivamente. O comportamento desse índice difere do que fôra observado para IEHD.

Na Figura 10, observa-se a formação de um patamar a partir de 61 DAE nos três sistemas de preparo avaliados. Nesse momento, inicia-se, provavelmente, o período de senescência em todos os tratamentos e as temperaturas medidas nos sistemas escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa apresentam-se próximos àqueles da parcela de referência, demonstrando a pouca dependência sobre o manejo da água, e proporcionando pequenos incrementos no índice TSD acumulado.

As épocas que apresentaram os maiores acúmulos de TSD aproximaram-se daquelas de maior tensão de água no solo registradas ao longo do ciclo do feijoeiro para os tratamentos convencional com arado de disco e enxada rotativa e ocorreram de 40 a 41 DAE e de 47 a 48 DAE respectivamente.

No tratamento escarificador, o segundo maior valor de TSD registrado foi de 2,5 aos 29 DAE, e o segundo maior valor de TSD acumulado para um intervalo de quatro dias foi 6,8 no período de 29 a 32 DAE. Esse período também coincidiu com aquele que apresentou o maior valor de tensão de água no solo medido com tensiômetros e que ocorreu de 29 a 30 DAE.

Portanto, o índice de estresse hídrico com base na comparação entre a temperatura do dossel e a de uma superfície da mesma cultura bem molhada (TSD) apresentou maior conformidade com as leituras de tensiometria para indicar os períodos de maior estresse em relação ao índice IEHD.

Jackson (1982) explica que o uso de parcelas bem irrigadas como referência compensa efeitos do meio, tais como temperatura do ar e déficit de pressão de vapor. Clawson & Blad (1982) determinaram a variabilidade da temperatura da cobertura vegetal para a cultura do milho e a diferença de temperatura entre as parcelas irrigadas e sob estresse, para avaliar a adequação do uso de termômetros infravermelhos manuais para o planejamento da irrigação. Esses mesmos autores concluíram que a variabilidade da temperatura do dossel pode ser usada para indicar o momento de estresse da planta, mas a severidade desse estresse é mais bem indicada pela magnitude da elevação média da temperatura do dossel em relação àquela de uma parcela bem irrigada.

Os valores acumulados de TSD ao final do ciclo foram de 22,1; 35,0 e 47,2 °C para os tratamentos escarificador, arado de disco e enxada rotativa, concordando, em ordem crescente de valores dos sistemas, com aqueles obtidos com o índice IEHD.

Os resultados de tensiometria e temperatura da cobertura vegetal sugerem que o manejo da água adotado não propiciou períodos de deficiência hídrica severa na cultura ao longo do ciclo do feijoeiro.

4.2. Propriedades físico-hídricas do solo

4.2.1. Avaliação da variabilidade, distribuição dos dados e comparação de médias

As propriedades físico-hídricas do solo são apresentadas para os tratamentos com sistema de preparo escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa. Além desses, inclui-se, ainda, na discussão dos resultados, o tratamento com plantio direto, dada sua importância, haja vista a extensa literatura sobre tal sistema de manejo.

Na comparação das médias pelo teste de Wilks ($\text{prob}(F > F_c) = 0,0001$), Tabela 1A dos anexos, rejeita-se a hipótese de nulidade para as variáveis do solo na profundidade de 0 a 0,20 m, mostrando-se que há efeito de pelo menos um sistema de preparo de solo em alguma das variáveis observadas nesta camada. Sendo a probabilidade do nível de significância bastante baixo, podem-se considerar os resultados da análise univariada para cada uma das variáveis

de textura (argila, silte, areia grossa, areia fina), densidade de partículas, porosidade total, condutividade hidráulica saturada e infiltração, levando-se em conta as diferenças mínimas significativas entre as médias para cada sistema de preparo do solo pelo teste “t”.

4.2.1.1. Granulometria, densidade do solo e de partículas, porosidade total

A estatística descritiva para os valores de frações granulométricas coletadas em quarenta pontos distribuídos de forma homogênea por tratamento, na profundidade de 0 a 0,20 m, é apresentada na Tabela 2A dos anexos. As frações granulométricas apresentaram um coeficiente de variação (CV) entre 2,2 e 11,2%, sendo o teor de silte total aquele que apresentou a maior variabilidade, entre 5,9 e 11,2%.

As faixas observadas para os valores de coeficiente de variação caracterizam tal atributo como de baixa variabilidade, segundo a classificação apresentada por Warrick (1998).

A textura é um parâmetro para o qual se espera um nível médio de variabilidade, de acordo com Warrick (1998), porém, têm-se encontrado níveis distintos para as diferentes frações granulométricas, nos mais diversos solos, segundo resultados apresentados na literatura.

Em solos arenosos, tem sido encontrada uma variabilidade de média a alta para os teores de argila e silte e baixa variabilidade para o teor de areia. (Lima & Silans, 1999, Salviano et al. 1998, Souza et al., 1997), enquanto para solos siltosos, tem-se observado uma variabilidade baixa para essas frações granulométricas e média para teores de areia (Folegatti, 1996).

Na literatura, estudos em solos argilosos tem apresentado uma variabilidade baixa para os teores de argila e média para a areia (Gonçalves, 1997, Coelho Filho, 1998, Vieira, 1997).

Guimarães (2000) verificou, mediante a estatística clássica, diferenças entre as propriedades físico-hídricas do solo na profundidade de 0 a 0,20 m, em um Latossolo vermelho escuro de textura argilosa, localizado na região do cerrado e submetido aos sistemas de manejo plantio direto e convencional. A dispersão relativa das frações granulométricas,

medida pelo CV, foi baixa para ambos os sistemas de preparo. A exceção ocorreu para o silte e areia fina, que apresentaram uma variabilidade média, com um CV entre 16,4 e 25,2%.

Na Tabela 2A, verificou-se que a hipótese de normalidade é rejeitada para a maioria das frações granulométricas, nos diferentes tratamentos estudados, pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5%. As exceções ficaram por conta da argila e silte dos sistemas de preparo convencional com arado de disco e enxada rotativa.

A distribuição das variáveis relacionadas à textura por sistema de preparo do solo e profundidade de 0 a 0,20 m estão representadas no “Box plot” da Figura 11.

Com base nessa figura, observa-se que as frações argila e silte foram as que se apresentaram mais simétricas, com a média aritmética aproximando-se da mediana, o que é uma indicação da distribuição normal dos valores destas frações, apesar dos dados observados nos tratamentos escarificador e plantio direto não terem suas distribuições caracterizadas desta forma pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5%. Além disso, de forma geral, dos tratamentos avaliados aquele que apresentou menor amplitude interquartilica foi o sistema de preparo escarificador.

Não foi identificado um padrão para a distribuição de frequência dos valores de textura com base nos trabalhos avaliados. Para solos arenosos, Lima & Silans (1999) e Salviano et al. (1998) encontraram distribuição normal para todas as frações avaliadas, enquanto Souza et al. (1997) observaram que a distribuição log normal foi a que melhor se adequou aos teores de areia total, silte e argila.

Resultados semelhantes podem ser observados na avaliação realizada em solo siltoso por Folegatti (1997) que indicou a normalidade dos dados pela análise dos coeficientes de assimetria e curtose, apesar do número relativamente pequeno de amostras coletadas, ou seja, em torno de 25.

Na relação de trabalhos avaliados, englobando solos argilosos, Guimarães (2000) observou que a fração areia, principalmente no plantio convencional, afastou-se da condição da normalidade, enquanto as frações mais finas, como a argila e silte, aproximaram-se dessa distribuição, como ocorreu no presente trabalho.

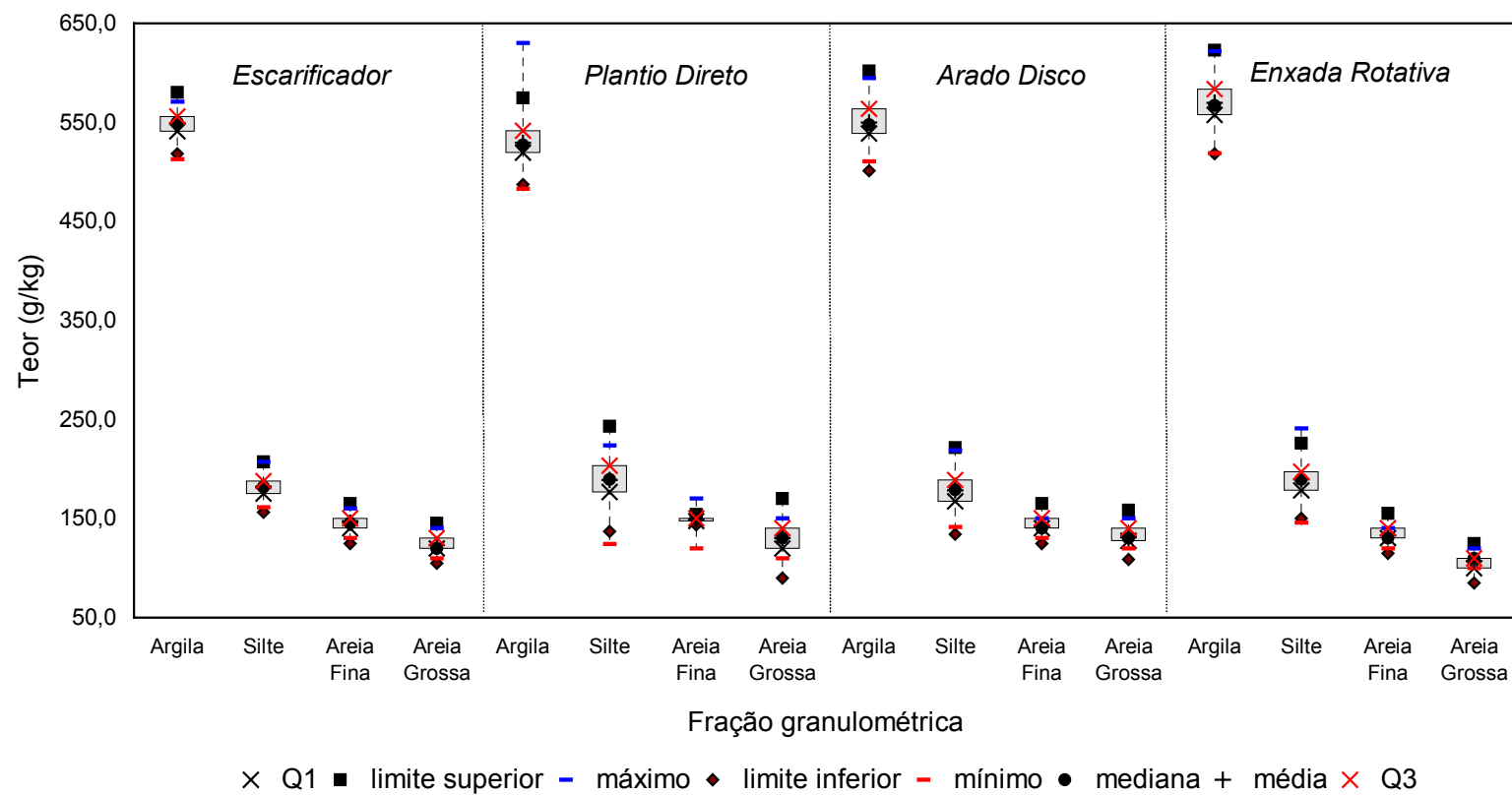


Figura 11. Gráfico “Box plot” dos valores da fração granulométrica para os sistemas de preparo motomecanizados escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,20 m em Latossolo vermelho.

Gonçalves (1997) encontrou resultados contraditórios de acordo com o esquema de coleta das amostras. Para um sistema de amostragem em malha, totalizando 82 pontos, obteve uma distribuição normal para todas as frações granulométricas avaliadas, na camada de 0 a 0,20 m. Contudo, quando amostraram-se 59 pontos em uma transeção, dentro da mesma área, a normalidade dos dados não foi verificada para nenhuma das frações avaliadas. Por fim, o autor avaliou todos os dados amostrados, em malha e na transeção, totalizando 133 amostras e não encontrou uma distribuição normal para os valores das frações granulométricas.

Para um Latossolo roxo, Vieira (1997) observou uma distribuição normal dos valores das frações granulométricas, com exceção do teor de silte na camada de 0,25 a 0,50 m, que apresentou uma distribuição log-normal.

Na comparação das médias, apresentada na Tabela 2A dos anexos, o sistema de preparo do solo enxada rotativa apresentou os maiores valores médios das frações granulométricas argila e silte e conseqüentemente, os menores teores de areia fina e grossa.

Nas frações mais grosseiras do solo, o sistema plantio direto obteve valores significativamente mais elevados na fração areia fina, enquanto para a areia grossa não diferiu significativamente do sistema convencional com arado de disco, o qual apresentou o maior teor dessa fração. Tais resultados contradizem os de Guimarães (2000), os quais revelam uma tendência de variabilidade e médias mais altas das frações areia fina, areia grossa e areia total para o plantio convencional em relação ao plantio direto.

Tal contradição, ocorre, provavelmente devido à baixa variabilidade da textura do solo, levando a que pequenas diferenças tornem-se significativas, não havendo, a princípio, subsídios que indiquem uma influência do sistema de preparo e manejo sobre esse atributo.

O tratamento escarificador apresentou valores intermediários para todas as frações granulométricas observadas.

Apesar das diferenças estatísticas observadas para textura, o solo apresenta valores de fração granulométrica que o colocam na condição de textura argilosa.

A densidade do solo é um atributo que apresenta baixa variabilidade e um coeficiente de variação inferior a 15% segundo Warrick (1998).

Os resultados apresentados na Tabela 3A são condizentes com essa afirmação, pois o CV variou de 9,8 a 12,7%, e a maior variabilidade dos dados ocorreu na camada mais

superficial do solo, de 0 a 0,10 m. A hipótese de normalidade não é rejeitada para a maioria das profundidades em cada tratamento, sendo a de 0 a 0,10 m a única em que se observou rejeição para dois tratamentos, escarificador e enxada rotativa. Esse fato, aliado à maior variabilidade nessa camada, é provavelmente justificado pela atuação do implemento, como já verificado em Vieira (1997).

Na Figura 12, pode-se observar a variação da densidade do solo em profundidade para os quatro tratamentos avaliados.

O plantio direto, onde não se tem a atuação do implemento, foi o único tratamento em que se verificou uma distribuição normal dos dados de densidade em todas as suas profundidades.

A maior variabilidade desse parâmetro na camada de 0 a 0,10 m pode estar associada ao sistema de amostragem, distribuído de forma homogênea e em malha por toda a área, e que provavelmente incluiu locais de trânsito de máquinas agrícolas.

Além disso, é uma camada explorada pelo sistema radicular da vegetação deixada entre as épocas de instalação da cultura e pela mesofauna, a qual foi observada no material coletado.

A baixa variabilidade na densidade do solo e a tendência a uma distribuição normal dos dados têm sido verificadas por diversos autores como Souza et al. (2001), Utset & Cid (2001), Guimarães (2000), Fietz (1998), Coelho Filho (1998), Tsegaye & Hill (1998), Gonçalves (1997), Folegatti (1996), Guimarães (1993), dentre outros.

A distribuição da densidade do solo por sistema de preparo e profundidade está representada no “Box-plot” da Figura 13, na qual se pode observar a simetria da distribuição pelas pequenas diferenças entre as médias e medianas, em todas as profundidades.

O teste de Wilk (Tabela 4A dos anexos) mostra que há efeito de sistema de preparo do solo, profundidades e sistema de preparo do solo *versus* profundidade, na análise para várias medidas de profundidade num mesmo sistema de preparo do solo ao nível de significância α de 0,01 e a ANOVA (Tabela 5A do anexo) é considerada.

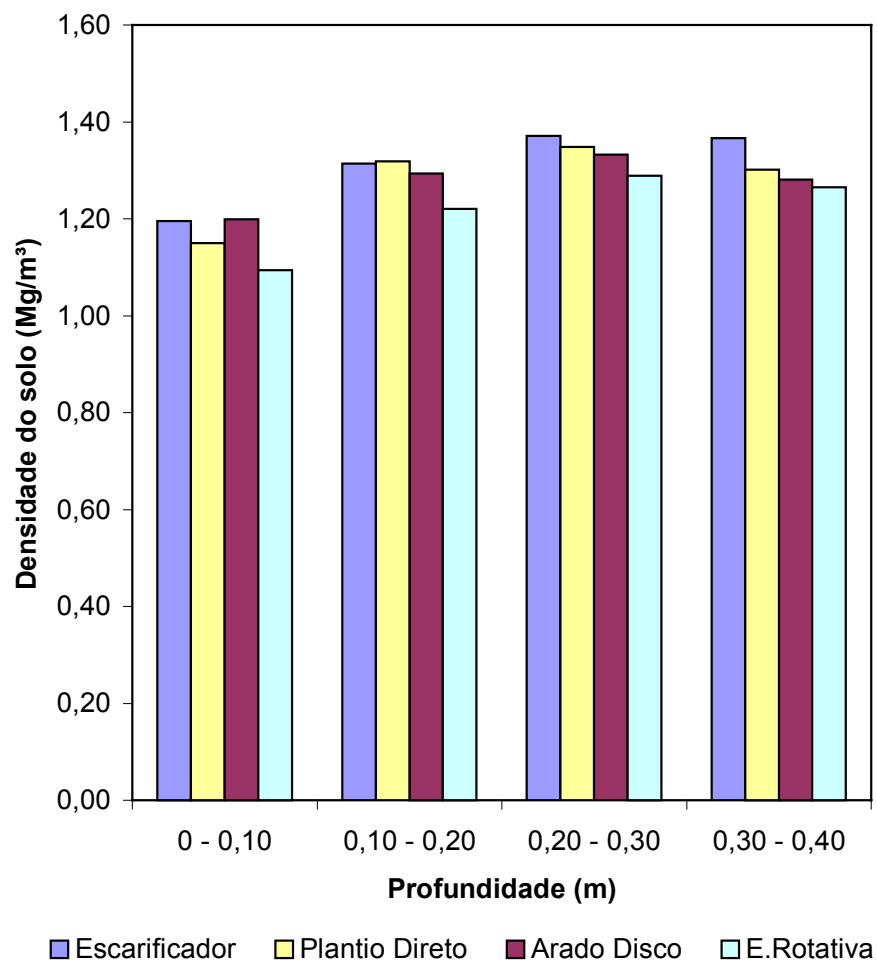


Figura 12. Variação da densidade do solo em profundidade para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

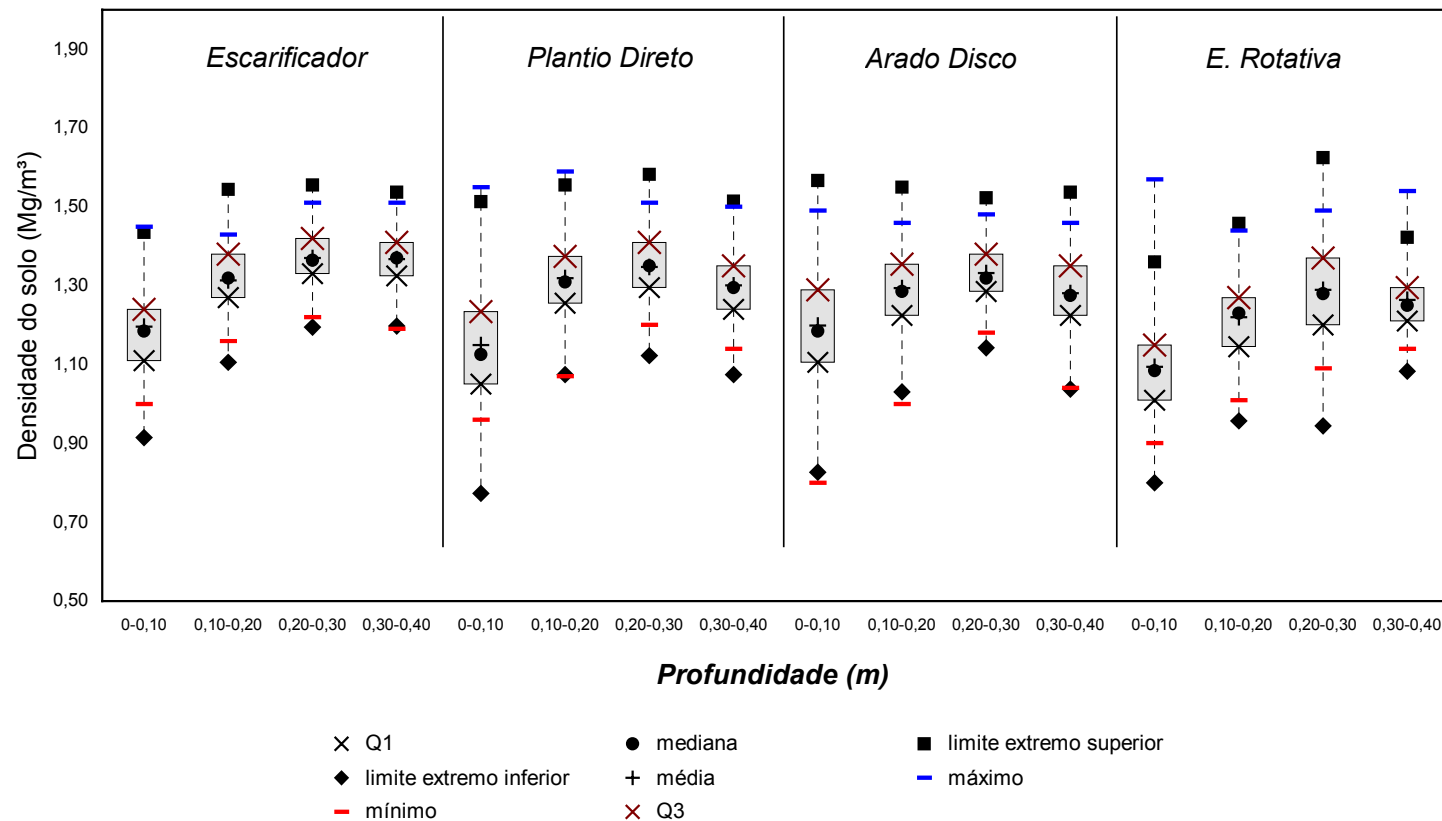


Figura 13. Gráfico “Box plot” dos valores de densidade do solo para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,40 m, em incrementos de 0,10 m, para um Latossolo vermelho, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Os tratamentos que apresentaram os maiores valores de densidade do solo até a profundidade de 0,20 m, não diferindo significativamente entre si, foram os sistemas de preparo escarificador, plantio direto e arado de disco. Considerando-se todas as profundidades, os tratamentos escarificador e plantio direto apresentaram os maiores valores, enquanto o sistema de preparo enxada rotativa foi o que obteve a menor densidade do solo, conforme resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre médias da variável densidade do solo dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.

Tratamento	Profundidade (m)				n
	0 – 0,10 m	0,10 – 0,20 m	0,20 – 0,30 m	0,30 – 0,40 m	
	----- (Mg m ⁻³) -----				
Escarificador	1,20a	1,31a	1,37a	1,37a	40
Plantio Direto	1,15ab	1,32a	1,35ab	1,30b	40
Arado Disco	1,20a	1,29a	1,33b	1,28bc	40
Enx. Rotativa	1,09b	1,22b	1,29c	1,26c	40
	dms=0,06 Mg m ⁻³	dms=0,04 Mg m ⁻³	dms=0,04 Mg m ⁻³	dms=0,04 Mg m ⁻³	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações

Todos os sistemas de preparo avaliados alcançaram o seu valor médio máximo de densidade do solo na camada de 0,20 a 0,30 m, como pode ser visto na Tabela 3.

Na literatura, tem-se encontrado uma diversidade de respostas relacionadas a um mesmo sistema de manejo, por causa das características de solo, planta, clima, etc. que interferem na dinâmica das transformações que o recurso natural solo possa apresentar.

Além disso, o tempo, a intensidade do uso e a época de amostragem são fatores que contribuem para essa diversidade encontrada quando se comparam resultados de diferentes experimentos.

Tabela 3. Comparação entre médias da variável densidade do solo nas profundidades avaliadas por sistema de preparo pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.

Profundidade (m)	Tratamento				n
	Escarificador	P. Direto	Arado Disco	Enx. Rotativa	
	----- (Mg dm ⁻³) -----				
0 – 0,10	1,20c	1,15c	1,20c	1,09c	40
0,10 – 0,20	1,31b	1,32ab	1,29ab	1,22b	40
0,20 – 0,30	1,37a	1,35a	1,33a	1,29a	40
0,30 – 0,40	1,37a	1,30b	1,28b	1,27ab	40
	dms=0,04 Mg m ⁻³	dms=0,05 Mg m ⁻³	dms=0,05 Mg m ⁻³	dms=0,05 Mg m ⁻³	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações

A maioria dos trabalhos avaliados, e relacionados à influência de sistemas de preparo sobre características físicas do solo, tem apontado para uma compactação na camada superficial em áreas manejadas com o sistema de plantio direto como citado em Stone & Silveira (2001), Beutler et al. (2001), Bertol et al. (2001), Oliveira et al. (2001), Guimarães (2000), Gómez et al. (1999), De Maria et al. (1999), Unger & Jones (1998), Mielke & Wilhelm (1998), Urchei et al. (1996), Grant & Lafond (1993), Centurion & Dematte (1992) dentre outros. Esse aumento da densidade na camada superficial tem sido associado a trânsito de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo no sistema plantio direto (Tormena et al., 1998).

Por outro lado, Castro (1995) encontrou poucas diferenças na densidade do solo para um Latossolo roxo submetido aos sistemas de preparo plantio direto, convencional e escarificador, ao longo de sete anos, até a profundidade de 1,20 m. Somente em duas profundidades ocorreram diferenças significativas: a primeira foi a 0,20 m com o sistema de preparo convencional apresentando um valor de 1,42 Mg m⁻³, significativamente maior que o plantio direto e o escarificador; a segunda, na profundidade de 0,60 m com o sistema de plantio direto alcançando o maior valor de densidade do solo.

Segundo Castro (1995), a maior densidade no preparo convencional a 0,20 m caracteriza muito bem a compactação ocasionada pela ação do arado. A pouca diferença entre

os tratamentos foi explicada pela época de amostragem, realizada no final do ciclo da cultura, não se detectando grandes diferenças do solo não mobilizado do plantio direto em relação àqueles revolvidos, pois com o tempo há o acomodamento do solo superficial, o que leva a valores de densidade semelhantes entre os sistemas, como provavelmente ocorreu no presente trabalho.

Xu & Mermoud (2001), Carvalho et al. (1999), Taboada et al. (1998), Albuquerque et al. (1995), Pikul & Aase (1995) e Anjos et al. (1994) também não encontraram aumento significativo da densidade do solo no sistema plantio direto quando comparado ao sistema convencional, como visto no presente trabalho.

Contrariando a maioria dos resultados encontrados na literatura, Pedroti et al. (2001a) em estudo sobre a compactação de um Planossolo cultivado sob diferentes sistemas de manejo, após oito anos, verificaram que os sistemas de preparo envolvendo maior mobilização do solo provocaram os mais elevados valores de densidade em relação aos sistemas de preparo reduzido. Na avaliação realizada por Carvalho et al. (1999), o tratamento grade pesada também acarretou adensamento maior na camada superficial em relação ao plantio direto, apesar de ser um tratamento que revolve mais o solo.

Corsini & Ferraudo (1999) avaliaram os efeitos imediatos e residual de dois sistemas de preparo na densidade e macroporosidade do solo, sobre um Latossolo roxo, mantido por longo período sob plantio direto e milho. Nos três primeiros anos agrícolas, a adoção contínua do sistema plantio direto diminuiu a macroporosidade e a densidade do solo, contudo, a partir do quarto ano até o oitavo houve uma melhoria gradativa das condições do solo, o que fez com que estes parâmetros atingissem os níveis anteriores à introdução do plantio direto. Tal fato demonstra que as condições negativas advindas do plantio direto podem ser revertidas ao longo dos anos com a manutenção do sistema.

Numa comparação entre o sistema escarificador e o convencional com arado de disco, após 11 anos de cultivo, Bordovski et al. (1999) observaram que sob sistema reduzido de preparo, a densidade do solo foi significativamente maior do que a encontrada no sistema convencional.

Maia (1999) avaliou a densidade do solo em duas camadas, de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m, em parcelas submetidas aos sistemas de preparo do solo escarificador, grade pesada e

arado de disco. Na camada superficial (0 a 0,10 m), o tratamento escarificador apresentou uma densidade de $0,92 \text{ Mg m}^{-3}$, significativamente maior do que o sistema grade pesada e não diferindo do arado de disco, que atingiram 0,87 e $0,91 \text{ Mg m}^{-3}$ respectivamente.

Na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), os sistemas de preparo grade pesada e escarificador apresentaram, respectivamente, valores de 1,18 e $1,24 \text{ Mg m}^{-3}$, os quais foram estatisticamente inferiores aos obtidos no tratamento arado de disco ($1,24 \text{ Mg m}^{-3}$).

Os valores observados por Maia (1999) foram inferiores aos deste trabalho, apesar de coletados em área contígua àquela do presente ensaio. O principal motivo foi o momento da amostragem, logo após as operações de preparo. Por isso, o sistema grade pesada que revolveu mais o solo apresentou valores, em média, significativamente inferiores aos demais sistemas nas camadas avaliadas.

A variação da densidade do solo ao longo do tempo também foi observada por Xu & Mermoud (2001) e Corsini & Ferraud (1999). Esse atributo do solo mostrou-se propenso a aumentar ao longo do tempo, a partir das operações de preparo, pela acomodação do solo com os sucessivos ciclos de molhamento e secagem, pelo impacto das gotas de chuva e pela desintegração dos agregados do solo.

A época da amostragem do presente trabalho foi provavelmente realizada no momento de maior densidade do solo na superfície e reflete, conseqüentemente, o efeito acumulado do sistema de preparo do solo ao longo dos anos.

A densidade de partículas, medida na profundidade de 0 a 0,20 m, apresentou baixa variabilidade, segundo a classificação de Warrick (1998), conforme pode ser visto na Tabela 6A dos anexos. A maior variabilidade dos dados ocorreu no tratamento plantio direto, o qual apresentou um coeficiente de variação de 3,9%, próximo ao encontrado por Gonçalves (1997) e Fietz (1998).

A hipótese de normalidade foi rejeitada para todos os tratamentos a partir do teste de Shapiro – Wilk, ao nível de 5%. O gráfico “Box plot” para a densidade de partículas do solo determinada para os quatro tratamentos na profundidade de 0 a 0,20 m é apresentado na Figura 14. Nesse gráfico, pode-se também observar que o tratamento arado de disco foi o que mais se aproximou de uma distribuição simétrica confirmado pelo valor da estatística de Shapiro Wilk, porém, insuficiente para não rejeitar a hipótese de normalidade.

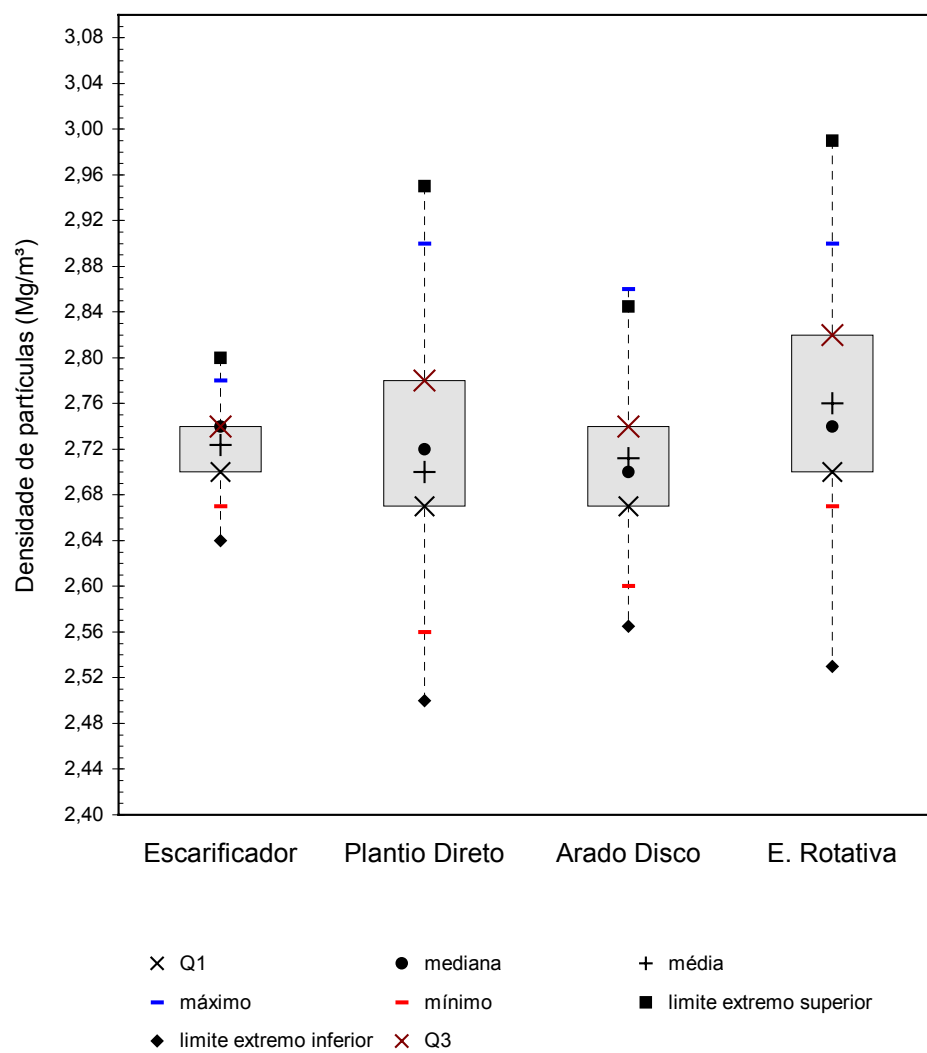


Figura 14. Gráfico “Box plot” dos valores de densidade de partículas para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

As maiores amplitudes interquartílicas foram apresentadas pelos tratamentos plantio direto e enxada rotativa, enquanto a menor, pelo sistema de preparo escarificador.

A hipótese de normalidade para a densidade de partículas também foi rejeitada por Gonçalves (1997). Por outro lado, Fietz (1998) em estudo da variabilidade espacial de armazenamento de água no solo, em Latossolo roxo, encontrou uma distribuição de frequência normal para 141 amostras retiradas na camada de 0 a 0,15 m.

A densidade de partículas depende da constituição mineralógica do solo variando, na maioria dos solos minerais, entre 2,6 e 2,7 Mg m⁻³, valor próximo à densidade do quartzo, mineral prevalecente na fração grosseira do solo (Hillel, 1998).

Contudo, segundo esse mesmo autor, a presença de óxidos de ferro e de outros minerais com densidade acima de 2,9 Mg m⁻³ contribui para elevar a média da densidade de partículas, enquanto a presença de matéria orgânica de baixa densidade geralmente reduz a densidade média dos sólidos.

Os resultados médios apresentados na Tabela 6A mostram uma variação na faixa de 2,71 a 2,76 Mg m⁻³, dentro do esperado para uma grande variedade de solos de acordo com Reichardt (1985).

Nesta tabela, a comparação de médias de densidade de partículas mostra que o tratamento enxada rotativa teve um valor médio significativamente maior em relação aos demais, os quais não diferiram entre si, ao nível de significância de 5%.

Anjos et al. (1994) encontraram pequenas diferenças na densidade de partículas ao avaliarem propriedades físicas de quatro tipos de solos em Santa Catarina, os quais foram submetidos aos seguintes sistemas de manejo: cultivo convencional, plantio direto, cultivo convencional com subsolagem e pastagem nativa.

Carvalho et al. (1999) não observaram diferença significativa no atributo densidade de partículas em uma comparação entre quatro tratamentos de preparo do solo, os quais incluíam o plantio direto e o convencional com arado de disco.

Outros autores têm apontado diferenças significativas no atributo densidade de partículas em estudos comparativos de sistemas de preparo do solo mesmo com pouco tempo de manejo.

Urchei et al. (1996) encontraram diferença estatística entre as médias na camada de 0,11 a 0,20 m, na qual o preparo convencional mostrou valor mais alto para densidade de partículas, em comparação com o plantio direto, após um ano de manejo apenas. Todavia, os próprios autores não acreditam na influência do manejo, pois os trabalhos na literatura têm mostrado pouco efeito do sistema de preparo sobre tal atributo.

Beutler et al. (2001) obtiveram valores de densidade de partículas significativamente superiores nos sistemas preparo grade aradora e arado de disco na profundidade de 0 a 0,05 m, sendo a causa relacionada aos menores teores de matéria orgânica proporcionados pelos tratamentos que revolvem mais o solo.

A porosidade total é outro parâmetro do solo para o qual se espera encontrar baixa variabilidade (Warrick, 1998). De fato, os resultados da Tabela 7A dos anexos mostram valores de CV variando de 5,2 a 8,5%. A hipótese de normalidade para esse atributo não foi rejeitada em nenhum dos tratamentos avaliados.

Resultados semelhantes, tanto na faixa dos valores de CV quanto para a normalidade observada na distribuição de frequência, foram obtidos por Souza et al. (2001), Guimarães (2000), Gonçalves (1997), Patgiri & Baruah (1995) dentre outros.

As distribuições de frequência da variável porosidade total estão representadas no “Box-plot” da Figura 15 para os quatro tratamentos avaliados na camada de 0 a 0,20 m, onde se pode observar a simetria da distribuição pelas pequenas diferenças entre as médias e medianas, em todas as profundidades.

Na comparação de médias de porosidade total apresentada na Tabela 7A, verifica-se que esse parâmetro foi significativamente afetado pelos sistemas de preparo do solo, como mostrado também por outros autores como Beutler et al. (2001), Stone & Silveira (2001), Guimarães (2000), Maia (1999), Mielke & Wilhelm (1998), Urchei et al. (1996), Anjos et al. (1994), Centurion & Dematte (1992).

Apesar da diferença significativa na densidade de partículas, os valores de porosidade estiveram inversamente associados àqueles de densidade do solo. Como consequência da densidade significativamente menor nas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m (Tabela 2), o sistema de preparo motomecanizado enxada rotativa apresentou porosidade significativamente maior em relação à dos demais tratamentos, os quais não diferiram estatisticamente entre si.

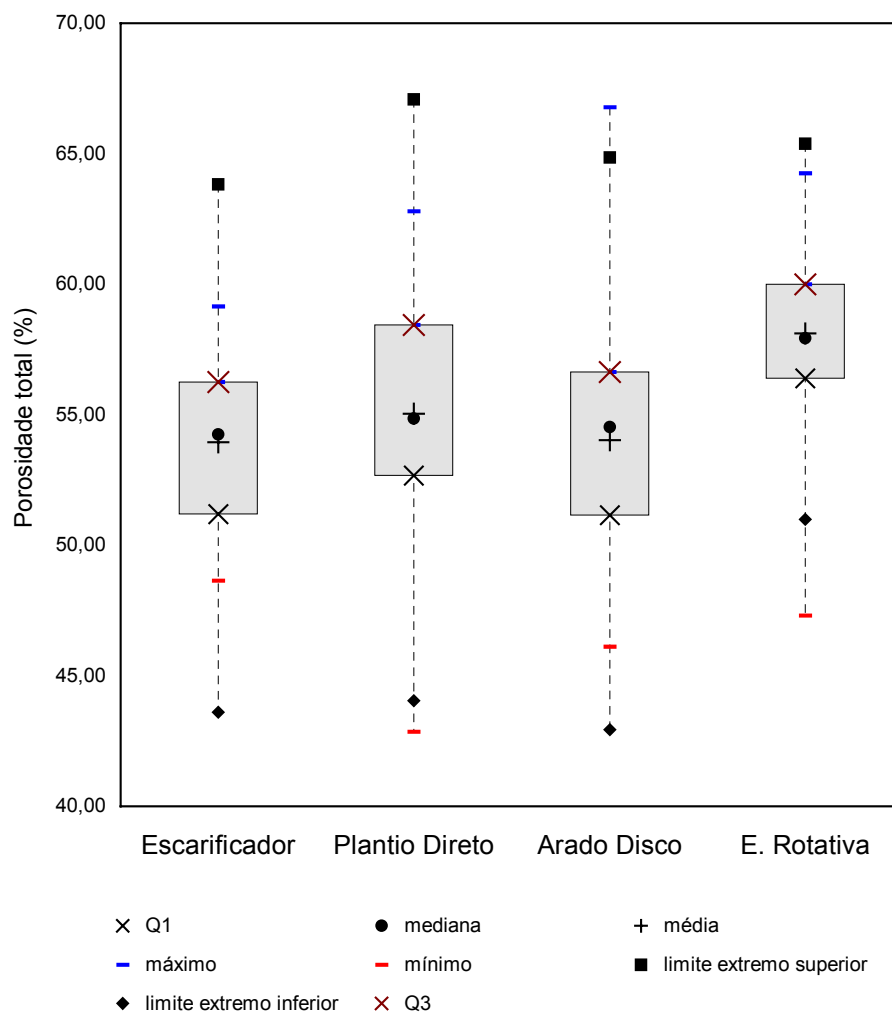


Figura 15. Gráfico “Box plot” dos valores da porosidade total para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0 a 0,20 m em Latossolo vermelho, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Diversos autores têm observado que o plantio direto apresenta valores estatisticamente menores de porosidade total em relação a outros sistemas de manejo (Beutler et al., 2001; Mielke & Wilhelm, 1998, Urchei et al., 1996, Stone & Silveira, 2001, Guimarães, 2000, dentre outros).

Por outro lado, alguns autores não encontraram diferença nos valores médios observados de porosidade total quando comparados o sistema de manejo plantio direto e o convencional. (Oliveira et al., 2001, Albuquerque et al., 1995)

O sistema de preparo do solo escarificador foi o que apresentou os maiores valores médios de porosidade total nas camadas de solo de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m, em experimento realizado por Maia (1999).

Na profundidade de 0 a 0,10 m, a porosidade total do tratamento escarificador atingiu 63,6%, não diferindo estatisticamente do tratamento arado de disco, que obteve 63,3%, porém, ambos diferiram do sistema grade aradora, cujo valor de porosidade total foi de 60,3%.

Já na profundidade de 0,10 a 0,20 m, o tratamento escarificador continuou apresentando uma porosidade total maior e não diferindo daquela observada no tratamento arado de disco, além de ser significativamente maior em relação àquela mostrada pelo sistema grade aradora. Os valores alcançados para os tratamentos escarificador, arado de disco e grade aradora, nessa camada, foram de 62,7; 61,6 e 60,0% respectivamente.

Comparando-se os resultados de porosidade total do presente trabalho aos que se determinaram em Maia (1999), pode-se observar a superioridade dos valores deste estudo, apesar de ambos terem sido desenvolvidos no campo experimental da Feagri. Como já colocado na discussão sobre a densidade do solo, as determinações realizadas por Maia (1999) foram realizadas em seguida às operações de preparo do solo, levando a valores mais reduzidos de densidade do solo e, conseqüentemente, a maiores valores de porosidade total.

Lucarelli (1997) estudou a influência do sistema de preparo do solo nas características físico-hídricas do solo nas mesmas áreas experimentais avaliadas neste trabalho, no ano de 1995, ou seja, quatro anos antes do presente ensaio. No estudo citado, as determinações foram realizadas em trincheiras, numa quantidade de amostragens por parcela que não possibilitou a comparação estatística entre os tratamentos. Compararam-se, no presente, os resultados de

porosidade total obtidos pelo autor àqueles arrolados neste trabalho, a fim de avaliar a concordância ou não das observações.

Os resultados de Lucarelli (1997), na camada superficial do solo até 0,20 m de profundidade, mostram que o tratamento escarificador e plantio direto apresentaram os maiores valores: em média de 64 e 62%, respectivamente, enquanto nos tratamentos arado de disco e enxada rotativa atingiu-se 55,8 e 55,6% respectivamente. Com exceção dos tratamentos de preparo reduzido e plantio direto, os outros tratamentos tiveram valores próximos aos encontrados neste trabalho.

Uma das fontes de variação pode ser o método empregado, pois em Lucarelli (1997) a porosidade total foi determinada da mesma forma que em Maia (1999), ou seja, utilizando da umidade em base volume na saturação. A diferença no valor da densidade do solo, na camada de 0 a 0,20 m, menor na época de amostragem feita por Lucarelli (1997), em torno de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$, e maior na do presente trabalho, $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, para o tratamento escarificador, pode ser outro dos motivos.

No tratamento arado de disco, Lucarelli (1997), observou uma densidade do solo em torno de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, a qual se aproxima da que é apresentada neste trabalho, ou seja, $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$. Conseqüentemente, demonstra-se a influência das condições físicas na época de amostragem sobre a porosidade total do solo.

4.2.1.2. Curva de retenção de água no solo, qualidade dos poros e disponibilidade total de água no solo

A Figura 16 e a Tabela 8A dos anexos apresentam as curvas de retenção de água no solo para os tratamentos avaliados neste ensaio e os parâmetros calculados pelo modelo de Dourado Neto et al. (1990).

A qualidade da porosidade total do solo pode ser medida por meio da macroporosidade e da microporosidade.

A microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo e a macroporosidade influencia diretamente a capacidade de infiltração, a drenabilidade do solo e sua capacidade de aeração (Hillel, 1998).

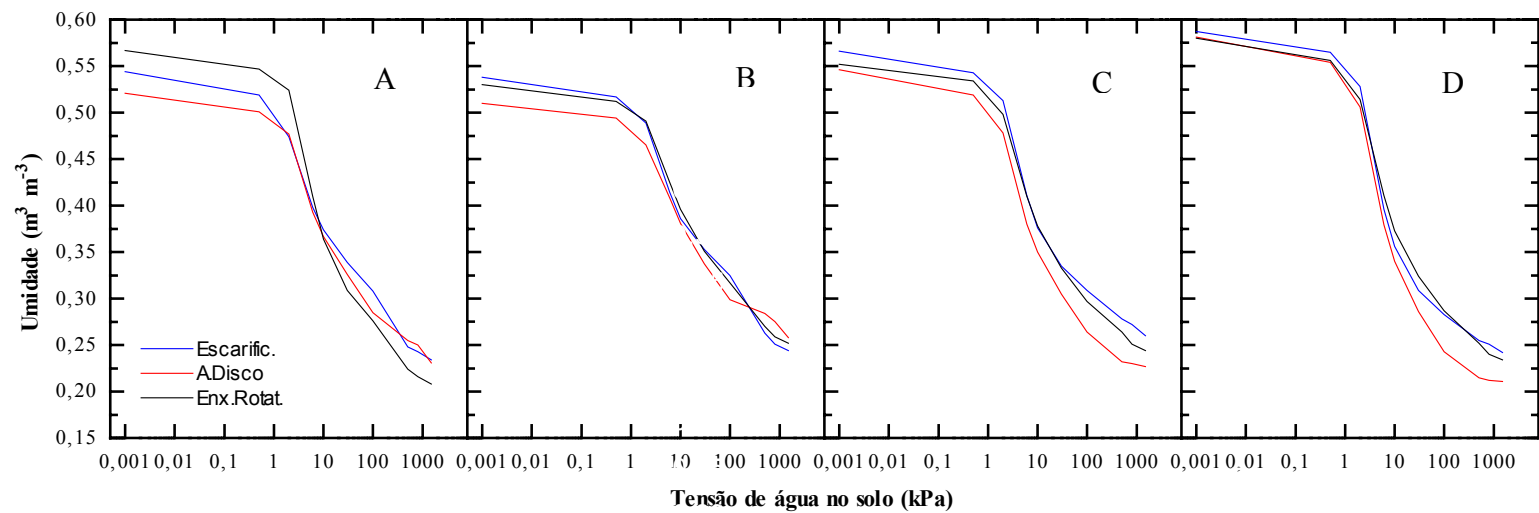


Figura 16. Valores da curva de retenção de água no solo de um Latossolo vermelho submetido aos sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

A porosidade total, a macroporosidade, microporosidade e lâmina total de água disponível para a camada do solo de 0 a 0,60 m, em incrementos de 0,15 m, foram determinadas pelos dados da curva de retenção.

O teste de Wilk (Tabelas 9A, 11A, 13A e 15A) mostra que há efeito do sistema de preparo do solo e profundidades na porosidade total, macroporosidade, microporosidade e lâmina total de água disponível no solo na análise para as várias profundidades num mesmo sistema de preparo do solo ao nível de significância α de 0,05 e a ANOVA (Tabela 10A, 12A, 14A e 16A) são consideradas.

Apresentam-se na Tabela 4 os resultados da comparação de médias para a porosidade total, macroporosidade, microporosidade e lâmina total de água disponível do solo por profundidade.

Os valores observados de porosidade total na camada superficial do solo com base nos dados da curva de retenção foram inferiores àqueles determinados pela equação 4, cujos dados de densidade do solo e de partículas encontram-se na Tabela 7A.

Um dos fatores que pode ter contribuído para tal relação de inferioridade refere-se ao método de amostragem do solo utilizado. As amostras coletadas por meio do equipamento descrito em Teixeira (1998) apresentaram os seguintes valores médios de densidade do solo: 1,26; 1,23; 1,25 e 1,19 Mg m^{-3} , enquanto pelo método do anel volumétrico os valores foram 1,33; 1,39; 1,33 e 1,20 Mg m^{-3} para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa respectivamente, até a profundidade de 0,20 m.

A maior diferença relativa nos valores de densidade na camada superficial ocorreu no plantio direto, atingindo 0,130 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que pode ter levado à maior variação relativa na porosidade total entre os dois métodos, a qual alcançou 0,102 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo a menor diferença observada no tratamento enxada rotativa.

Valores significativamente superiores de macroporosidade foram observados na camada superficial (0 a 0,15 m), para o tratamento enxada rotativa, em subsuperfície (0,15 a 0,30 m), no tratamento escarificador e nas mais profundas (0,30 a 0,45 m e 0,45 a 0,60 m), para o sistema convencional com arado de disco.

Tabela 4. Comparação de médias para porosidade total na profundidade de 0 a 0,60 m e intervalo de confiança da média ao nível de 95%, para um Latossolo vermelho sob os sistemas de preparo do solo em Campinas – SP, no ano de 1999.

Tratamento	Profundidade (m)				n
	0 - 0,15	0,15 - 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	
Porosidade total					
	----- m³ m⁻³ -----				
Escarificador	0,544b	0,538a	0,566a	0,587a	9
Plantio Direto	0,498d	0,499b	0,521c	0,535b	9
Arado de Disco	0,521c	0,510b	0,547ab	0,581a	9
Enx. Rotativa	0,567a	0,530a	0,552b	0,580a	9
	dms=0,019 m³ m⁻³	dms=0,016 m³ m⁻³	dms=0,017 m³ m⁻³	dms=0,017 m³ m⁻³	
Macroporosidade					
	----- m³ m⁻³ -----				
Escarificador	0,145ab	0,123a	0,156ab	0,191ab	9
Plantio Direto	0,85c	0,95b	0,117c	0,124c	9
Arado de Disco	0,127b	0,102ab	0,166a	0,201a	9
Enx. Rotativa	0,157a	0,105ab	0,142b	0,169b	9
	dms=0,028 m³ m⁻³	dms=0,022 m³ m⁻³	dms=0,024 m³ m⁻³	dms=0,027 m³ m⁻³	
Microporosidade					
	----- m³ m⁻³ -----				
Escarificador	0,398ab	0,414ab	0,410a	0,396a	9
Plantio Direto	0,413a	0,404b	0,403a	0,411a	9
Arado de Disco	0,393b	0,408b	0,381b	0,379b	9
Enx. Rotativa	0,411ab	0,425a	0,410a	0,411a	9
	dms=0,019 m³ m⁻³	dms=0,015 m³ m⁻³	dms=0,014 m³ m⁻³	dms=0,017 m³ m⁻³	
Lâmina total de água disponível					
	----- mm -----				
Escarificador	21,4ab	21,6a	17,6b	17,0b	9
Plantio Direto	19,7b	18,7b	19,3ab	21,4a	9
Arado de Disco	20,1b	19,0b	18,6ab	19,4ab	9
Enx. Rotativa	23,3a	22,1a	20,6a	21,4a	9
	dms = 2,8 mm	dms = 2,2 mm	dms = 2,3 mm	dms = 2,7 mm	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações.

As médias estatisticamente inferiores de porosidade total e macroporosidade do solo, até a profundidade de 0,60 m, ocorreram no tratamento plantio direto. Esses resultados concordam com os que foram descritos por outros autores, como Stone & Silveira (2001), Oliveira et al. (2001), Guimarães (2000), Carvalho et al. (1999), Urchei et al. (1996).

Apesar dos maiores valores de densidade do solo encontrados para o tratamento escarificador (Tabela 2) e que poderiam levar a uma redução da porosidade total, em especial dos macroporos (Hillel, 1998), o que se observou foi uma superioridade significativa desse tratamento ao longo do perfil do solo, com exceção da camada 0 a 0,15 m.

O comportamento da microporosidade ao longo do perfil revelou que o plantio direto apresentou valores significativamente mais elevados na camada superficial, de 0 a 0,15 m, e na mais profunda, 0,45 a 0,60 m, não diferindo estatisticamente dos maiores valores na camada de 0,30 a 0,45 m. Alguns autores têm observado valores superiores de microporosidade no sistema de manejo plantio direto, principalmente próximo à superfície, como Carvalho et al. (1999), Stone & Silveira (2001), Guimarães (2000), Urchei et al. (1996). Por outro lado, Oliveira et al. (2001) encontraram valores significativamente superiores de microporosidade total no sistema convencional, quando comparado ao cultivo mínimo e ao plantio direto, na camada superficial do solo.

Albuquerque et al. (1995), a exemplo do que ocorreu com a porosidade total, não encontraram diferenças significativas entre macro e microporosidade para os manejos convencional e plantio direto, contradizendo a maioria dos trabalhos.

Maia (1999) encontrou valores de macroporosidade significativamente superiores no tratamento escarificador em relação ao sistema grade pesada, não diferindo estatisticamente em relação ao arado de disco, para duas camadas de solo analisadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. A microporosidade não apresentou diferenças estatísticas na camada de 0 a 0,10 m, porém, na camada de 0,10 a 0,20 m o sistema arado de disco alcançou valores significativamente maiores em relação aos demais tratamentos.

Contrariando a maioria dos resultados de pesquisa apresentados, Lucarelli (1997) encontrou valores superiores de macroporosidade próximo à superfície do solo no sistema plantio direto em relação aos tratamentos escarificador, arado de disco e enxada rotativa, os quais atingiram 0,262; 0,221; 0,126 e 0,113 m³ m⁻³ respectivamente. Em contrapartida, a

microporosidade na semeadura direta foi a menor, atingindo $0,395 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto os sistemas escarificador, arado de disco e enxada rotativa alcançaram 0,420; 0,444 e $0,442 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente. Contudo, esses resultados devem ser considerados como valores de referência, visto que não houve condições de se realizar uma comparação estatística.

Pode-se concluir que o tratamento escarificador foi o que apresentou melhor distribuição de poros tanto em quantidade quanto em qualidade sendo este um fator apontado como benéfico para o desenvolvimento radicular de diversas culturas por Castro (1995).

A lâmina total de água disponível do solo é um parâmetro básico em projetos e manejo de irrigação e está relacionada diretamente à capacidade de armazenamento de água no solo.

O sistema de preparo motomecanizado enxada rotativa apresentou resultados significativamente mais elevados de lâmina total de água disponível, ao longo de todo o perfil do solo, conforme apresentado na Tabela 4.

Já o tratamento escarificador teve um comportamento distinto em duas camadas analisadas. Naquela em que atua o implemento, de 0 a 0,30 m de profundidade, os valores encontrados estiveram entre os mais altos, não diferindo estatisticamente do sistema enxada rotativa. Abaixo desta camada, 0,30 a 0,60 m, esse sistema de preparo apresentou o pior desempenho, o que o levou a ser o terceiro tratamento em lâmina total de água disponível no solo.

O outro tratamento conservacionista, o plantio direto, teve um desempenho completamente distinto, apresentando valores significativamente menores em relação aos demais tratamentos na camada superficial do solo, de 0 a 0,30 m, e significativamente superiores nas camadas mais profundas, 0,30 a 0,60 m.

4.2.1.3. Condutividade hidráulica saturada e infiltração básica

A condutividade hidráulica (k_{fs}) é uma medida da capacidade do solo em transmitir água sob condições saturadas sendo um valor constante para uma determinada posição no campo, em um dado tempo, e um parâmetro chave para todos os aspectos de movimento de água e soluto no solo. (Amoozegar & Warrick, 1986)

Esse parâmetro é afetado tanto por características do solo, como a porosidade total, a distribuição do tamanho dos poros, a tortuosidade, em resumo a geometria dos poros do solo e

sua textura, quanto por características do fluido, como a densidade e viscosidade (Hillel, 1998).

Reichardt (1985) denomina infiltração o processo pelo qual a água entra no solo, representando a sua permeabilidade.

As estatísticas descritivas e comparação de médias da condutividade hidráulica saturada e da infiltração básica, a uma profundidade de 0,15 m, estão representadas nas Tabelas 17A e 18A respectivamente. As suas distribuições de frequência estão representadas no “Box-plot” da Figura 17.

A hipótese de normalidade foi rejeitada para a maioria dos tratamentos, conforme demonstrado pelo teste de Shapiro – Wilk, concordando com o observado por Guimarães (2000), as exceções foram os tratamentos escarificador e enxada rotativa que apresentaram uma distribuição normal para os dados de condutividade hidráulica saturada e infiltração, respectivamente.

Propriedades relacionadas ao movimento de água no solo, como a condutividade hidráulica saturada, têm apresentado uma distribuição log-normal (Tsegaye & Hill, 1998). Contudo, Guimarães (2000) não encontrou melhora significativa ajustando os dados de k_{fs} para essa distribuição. Alguns estudos têm inclusive, revelado, uma distribuição normal para a condutividade hidráulica saturada e infiltração (Lima & Silans, 1999).

Nielsen et al. (1996) afirmam que estimativas de características hidráulicas do solo, como a infiltração, são dependentes do método utilizado, afetando ainda a sua função de distribuição de probabilidade.

Além disso, mesmo utilizando-se somente de um método específico para a determinação do parâmetro, a função de distribuição de probabilidade é afetada pelo tipo de abordagem teórica para a sua determinação. Esse é um fator importante que justifica a gama de funções de distribuição para a condutividade hidráulica saturada na literatura e a dificuldade de se realizarem análises comparativas.

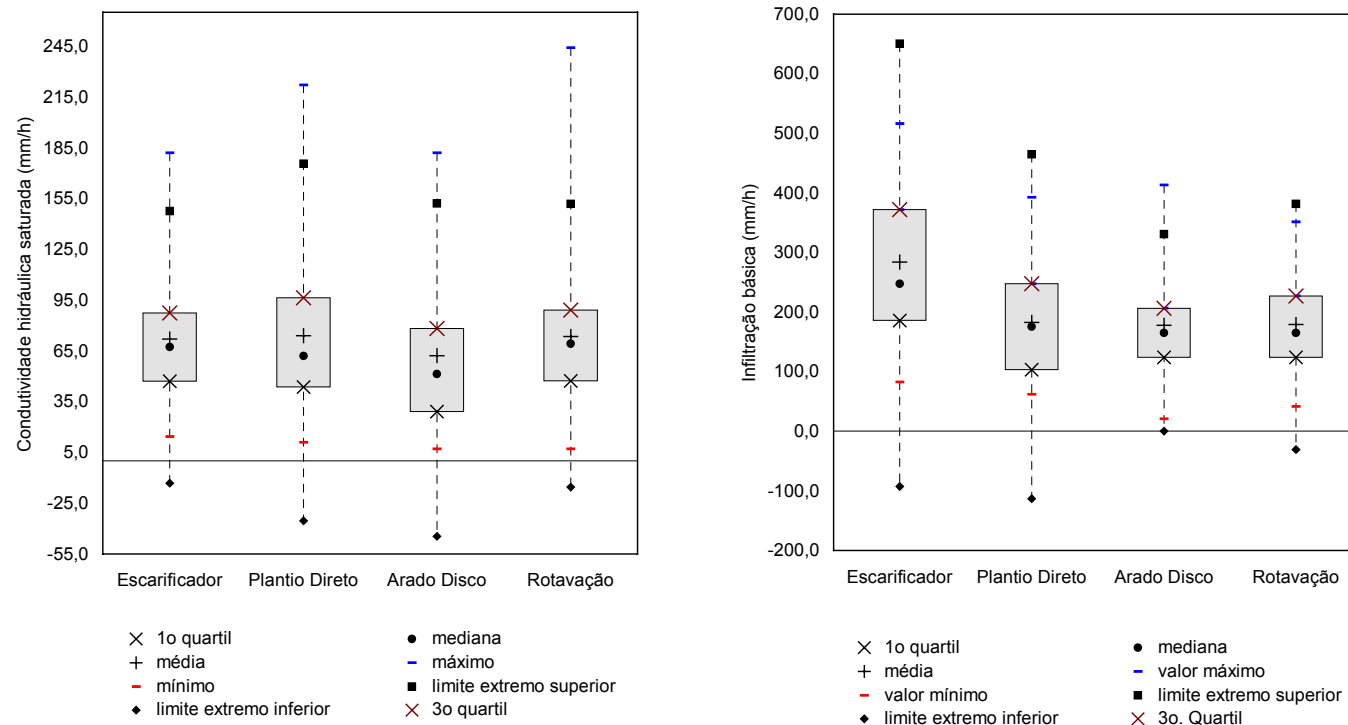


Figura 17. Gráfico “Box plot” dos valores de condutividade hidráulica saturada e de infiltração básica para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados na profundidade de 0,15 m em Latossolo vermelho, na cidade de Campinas-SP, no ano de 1999.

Parte das referências citadas neste capítulo, incluindo Bertolani & Vieira (2001), Beutler et al. (2001), Guimarães (2000), Maia (1999), Castro (1995) e Arzeno (1990), revelam que as determinações de condutividade hidráulica saturada e permeabilidade foram realizadas praticamente na mesma profundidade que fora adotada no presente trabalho, utilizando tanto o método do permeâmetro de Guelph quanto o procedimento de cálculo.

Observou-se alta variabilidade dos dados, tanto para a condutividade hidráulica saturada quanto para a infiltração básica, com coeficientes de variação próximos a 50%, os quais se encontram no limite entre a variabilidade média e alta, segundo a classificação proposta por Warrick (1998).

Estudos têm sugerido que a condutividade hidráulica saturada é uma das propriedades do solo com maior variabilidade (Warrick, 1998). Essa afirmação tem sido corroborada por outros autores, como Guimarães (2000), Tsegaye & Hill (1998), Lima & Silans (1999) dentre outros.

O mesmo tem ocorrido com a infiltração básica, a qual apresentou uma variabilidade alta, segundo a classificação proposta. Outros autores também encontraram resultados com coeficiente de variação da mesma ordem de grandeza, como Bertolani & Vieira (2001), Guimarães (2000) e Maia (1999). Nesses trabalhos, basicamente relacionados à variabilidade espacial de parâmetros de solo, tem-se uma quantidade de dados de condutividade hidráulica saturada amostrados, que permite uma análise estatística descritiva desta natureza.

Tsegaye & Hill (1998) pesquisaram o efeito do uso intensivo de sistemas de preparo sobre a variabilidade espacial e tamanho da amostragem exigida para classificar as propriedades do solo. Esses mesmos autores também encontraram altos valores de coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada, atingindo 172,9 e 231,4% para as profundidades sujeitas à ação dos implementos agrícolas.

Bertolani & Vieira (2001) estudaram a variabilidade espacial da taxa de infiltração em diferentes horizontes de um Argissolo vermelho-amarelo, com diferentes coberturas vegetais. Medidas de dispersão estatística também revelaram elevada variação de taxa de infiltração nos horizontes próximos à superfície.

Os valores médios observados de condutividade hidráulica saturada não diferiram estatisticamente entre os sistemas de preparo do solo, ao nível de significância α de 5%,

variando de 62,2 a 74,0 mm h⁻¹. Apesar de não haver uma diferença significativa, o plantio direto apresentou o maior valor de condutividade hidráulica saturada.

Guimarães (2000) obteve, para condutividade hidráulica saturada, valores de 8,1 e 5,6 mm h⁻¹, respectivamente, nos tratamentos plantio direto e convencional; contudo, essa diferença de 31% entre os valores médios não foi significativa, provavelmente em função da variabilidade dos dados que apresentou um coeficiente de variação de 106 e de 138% para os respectivos tratamentos.

O relato de diversos autores abordando o comportamento da condutividade hidráulica saturada e infiltração básica não mostra uma tendência consistente na relação desses parâmetros com o sistema de manejo ou preparo do solo, como observado para outros atributos tratados nesta tese.

Em alguns trabalhos, têm-se encontrado valores de condutividade hidráulica saturada e de infiltração superiores no plantio direto e em sistemas de preparo reduzido quando comparados a sistemas de preparo convencionais, mesmo quando a densidade do solo é maior na superfície, como visto em Guimarães (2000), Bordovski et al. (1999), Castro (1995), Anjos et al. (1994), Bruce et al. (1990) dentre outros.

Bordovsky et al. (1999) encontraram valores superiores de condutividade hidráulica saturada no sistema de preparo com escarificador, quando comparado ao sistema convencional para a camada superficial do solo, apesar de o sistema reduzido apresentar maior densidade do solo. Segundo os autores, isso pode ser atribuído, em parte, à maior quantidade de microagregados e, em parte, à maior quantidade de macroporos contínuos sob o sistema de preparo reduzido comparado com o sistema de preparo convencional.

No presente trabalho, o sistema escarificador também apresentou maior macroporosidade, juntamente com o sistema enxada rotativa, na camada de 0 a 0,30 m, conforme já discuido no item 4.5.1.3; contudo, o sistema plantio direto foi o que apresentou os valores mais reduzidos de macroporosidade e os mais elevados de k_{fs} . Portanto, não se deve considerar apenas um fator para avaliar o comportamento de um parâmetro dinâmico, como a condutividade hidráulica saturada.

Os valores de k_{fs} obtidos por Castro (1995), a 0,20 m de profundidade, foram significativamente maiores no plantio direto em comparação aos encontrados nos sistemas de

preparo convencional e escarificador. Na semeadura direta, a condutividade hidráulica saturada foi de 23,3 mm h⁻¹, enquanto nos sistemas escarificador e convencional com arado de disco observaram-se 9,2 e 10,8 mm h⁻¹ respectivamente, valores inferiores aos encontrados no presente trabalho, assim como os valores de coeficiente de variação que se apresentaram na ordem de 15%.

Segundo Castro (1995) valores mais altos de infiltração e condutividade hidráulica saturada nos sistemas com menor mobilização do solo, especialmente em plantio direto, podem ser explicados pela continuidade dos poros que facilita a movimentação tridimensional da água, mesmo que a porosidade total possa até ser menor, e pela maior atividade biológica da micro e mesofauna, a qual foi realmente observada durante a retirada de amostras para análise de densidade.

Lucarelli (1997) avaliou a continuidade dos poros ao longo do perfil, por meio de análise microscópica, nos mesmos tratamentos do presente trabalho e verificou que os sistemas escarificador, plantio direto e enxada rotativa foram os que apresentaram porosidade mais uniforme em todas as profundidades estudadas.

Na literatura, encontram-se trabalhos em que não são verificadas diferenças entre valores de condutividade hidráulica saturada em solos submetidos a sistemas de manejo distintos (Albuquerque et al., 1995, Xu & Mermoud, 2001), como também relatos de pesquisadores que têm encontrado valores de condutividade hidráulica saturada significativamente mais altos no plantio convencional em comparação aos do plantio direto (Gómez et al., 1999, Mielke & Wilhelm, 1998).

Os resultados de infiltração básica mostraram que o tratamento escarificador atingiu um valor médio significativamente mais alto em relação ao dos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si. Na avaliação desse parâmetro, os tratamentos conservacionistas apresentaram os maiores valores, 283,9 e 182,7 mm h⁻¹ para os sistemas escarificador e plantio direto respectivamente, em comparação aos sistemas enxada rotativa e arado de disco cujos valores foram 179,1 e 177,6 mm h⁻¹ respectivamente.

Alguns autores têm encontrado valores superiores de infiltração básica nos sistemas conservacionistas, como o plantio direto e escarificador, em relação aos chamados convencionais, como relatado em Guimarães (2000), Maia (1999), Castro (1995), Arzeno

(1990). Outros não observaram alterações significativas (Salih et al., 1998, Beutler et al., 2001)

Katsvairo et al. (2002) observaram efeitos dos sistemas de preparo e rotação de culturas sobre uma série de características do solo, em diferentes fases do desenvolvimento do milho, após seis anos de manejo. O sistema de preparo com arado aiveca mostrou uma taxa de infiltração mais baixa do que a do sistema de plantio em camaleão (ridge tillage) no estágio da sexta folha, contudo, comportamento inverso ocorreu na fase de enchimento de grãos.

Guimarães (2000) observou uma infiltração básica de $31,6 \text{ mm h}^{-1}$ no sistema plantio direto, valor 37% maior em relação ao encontrado no sistema arado de disco: $19,9 \text{ mm h}^{-1}$, em média. Embora alta, essa diferença relativa não foi significativa, provavelmente em função da magnitude do coeficiente de variação observado, da ordem de 48 a 65%.

Castro (1995) encontrou um valor médio de infiltração de $112,2 \text{ mm h}^{-1}$, a 0,2 m de profundidade, para o sistema plantio direto, o qual se mostrou significativamente superior às marcas de 54,6 e $46,2 \text{ mm h}^{-1}$, atingidas, respectivamente, pelos tratamentos escarificador e convencional.

Em Maia (1999), os valores de infiltração básica, determinados na profundidade de 0,2 m, foram de 113,2 e $100,9 \text{ mm h}^{-1}$ para os sistemas de preparo escarificador e convencional com arado de disco e não diferiram estatisticamente.

Comportamento oposto foi observado por Gómez et al. (1999) e Bertol et al. (2001), que obtiveram maiores valores de permeabilidade para o preparo convencional em relação à semeadura direta.

A estreita relação da capacidade de infiltração de água no solo com a continuidade dos poros têm-se revelado como o mais eficaz parâmetro para a indicação de variações entre os sistemas de manejo em relação a outras determinações, além de constituir-se como indicador da qualidade do solo (Arzeno, 1990 e Beutler et al., 2001).

Neste trabalho, a permeabilidade foi o parâmetro que demonstrou uma diferenciação entre os sistemas de preparo.

4.2.1.4. Resistência do solo à penetração e crescimento radicular

A resistência mecânica é um termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo (Pedrotti et al., 2001b)

O parâmetro resistência do solo à penetração (RSP) é muito utilizado para avaliar a compactação de solos agrícolas, a qual afeta o desenvolvimento radicular de diversas culturas, podendo limitar a camada do solo explorada pelas plantas, deixando-as mais susceptíveis ao estresse hídrico durante os períodos de seca.

Dois foram os momentos de avaliação da RSP: o primeiro, antes das operações de preparo, em um sistema de amostragem de quarenta pontos distribuídos conforme a Figura 3, e o segundo, no final do ciclo da cultura, nos locais onde se coletaram as raízes do feijoeiro.

Os principais fatores intervenientes na resistência do solo à penetração, além da textura e teor de matéria orgânica, são a umidade e a densidade do solo. Por esse motivo, uma análise pormenorizada da variabilidade e magnitude da umidade volumétrica do solo no momento da amostragem é necessária para que se possa inferir sobre os resultados de resistência do solo à penetração.

A representação da variabilidade da umidade do solo em base volume por sistema de preparo ao longo do perfil encontra-se no gráfico “Box-plot” da Figura 18, cujas estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 19A. Tais resultados referem-se à primeira amostragem, realizada antes das operações de preparo do solo.

A hipótese da normalidade não é rejeitada para a umidade volumétrica nos tratamentos escarificador, plantio direto e arado de disco, nas quatro profundidades analisadas; no sistema de preparo enxada rotativa, é rejeitada a hipótese de normalidade entre 0 e 0,10 m.

As faixas de valores de coeficiente de variação foram mais altas na camada superficial do solo. Isso se explica, provavelmente, pelos restos culturais do milho e pela presença de vegetação natural, os quais devem ter afetado a evaporação do solo. Apesar da influência desses fatores, a umidade do solo apresentou uma variabilidade baixa, segundo a classificação de Warrick (1998).

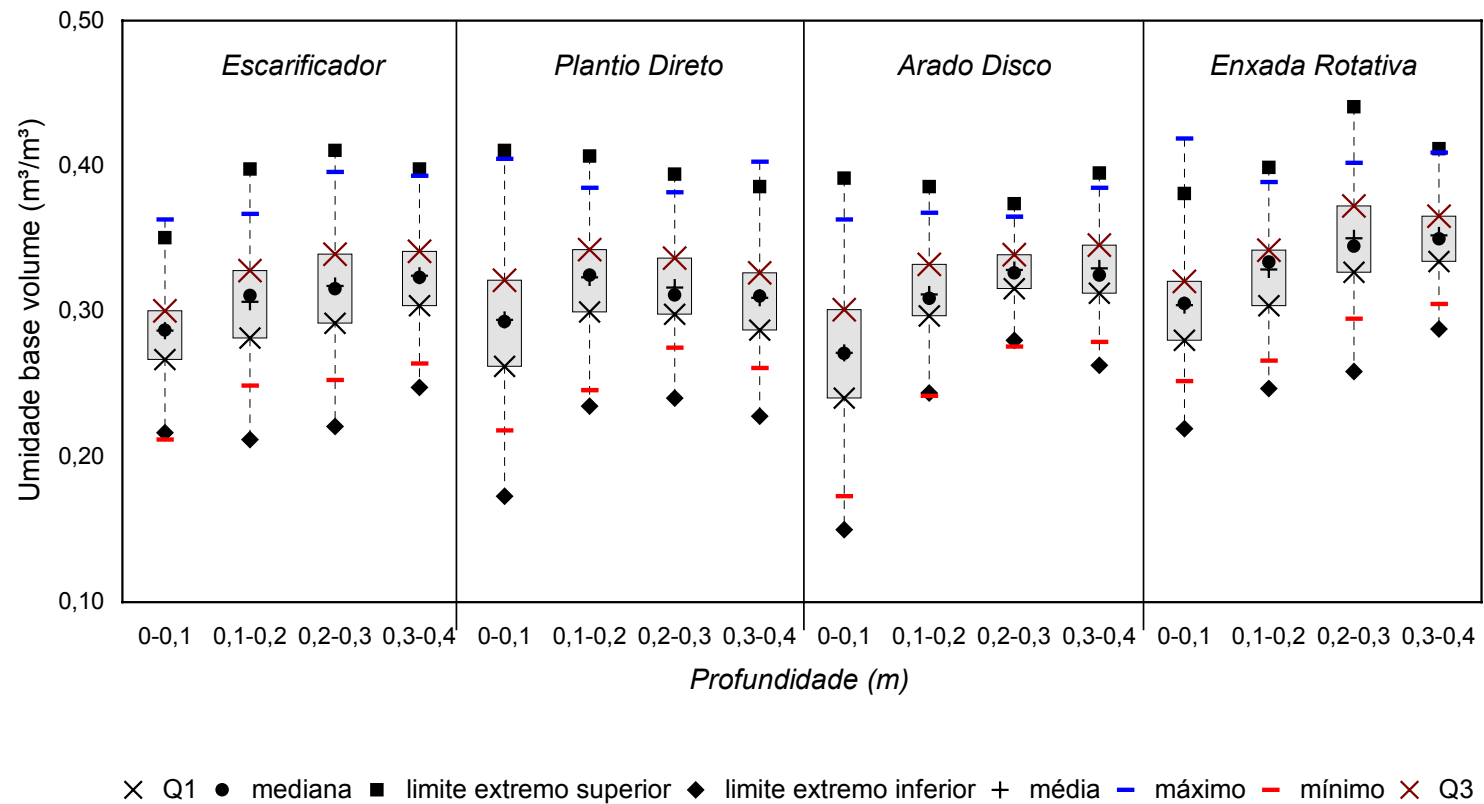


Figura 18. Gráfico “Box plot” dos valores de umidade volumétrica para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados em Latossolo vermelho durante o ensaio de resistência à penetração, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Souza et al. (2001) avaliaram a umidade durante ensaio de resistência à penetração do solo, encontrando uma distribuição de frequência de umidade próxima da log normal, e um coeficiente de variação de 6,4 e 3,9% para as camadas de 0 a 0,05 e de 0,15 a 0,20 m respectivamente.

Analizando-se a variabilidade dos dados ao longo do perfil, observa-se que o coeficiente de variação reduz-se em profundidade para todos os tratamentos, o que pode estar relacionado ao padrão de secamento do solo. A exceção foi o sistema de preparo escarificador, na camada de 0,20 a 0,30 m.

Para a realização da comparação das médias de umidade do solo, o teste de Wilk (Tabela 20A, dos anexos) mostra que há efeito de sistema de preparo do solo, profundidades e sistema de preparo do solo *versus* profundidade, na análise para várias medidas de profundidade para um mesmo sistema de preparo do solo e nível de significância α de 0,01.

Nesse caso, pode-se considerar a ANOVA (Tabela 21A, dos anexos) para os estudos das diferenças entre médias.

Considerando-se a média geral para a profundidade de 0 a 0,40 m, tem-se que a umidade volumétrica no tratamento enxada rotativa atingiu $0,334 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo significativamente maior em relação a dos tratamentos plantio direto, arado de disco e escarificador, que não diferiram entre si e alcançaram 0,311, 0,310 e $0,309 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente.

Na avaliação por profundidade, apresentada na Tabela 19A, o sistema de preparo enxada rotativa apresentou valores significativamente superiores em relação aos demais tratamentos de sistema de preparo do solo, influenciando os resultados de resistência do solo à penetração, conforme será visto mais adiante.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre profundidades no mesmo tratamento.

Os sistemas enxada rotativa, arado de disco e escarificador apresentaram um padrão semelhante de variação de umidade ao longo do perfil, sendo crescente em profundidade e atingindo o seu maior valor na camada de 0,30 a 0,40 m. O sistema plantio direto apresentou o maior teor de umidade volumétrica na profundidade de 0,10 a 0,20 m e melhor distribuição de umidade em subsuperfície, não diferindo significativamente entre si na camada de 0,10 a 0,40 m.

Tabela 5. Médias de umidade volumétrica por profundidade e tratamento em Latossolo vermelho para os sistemas de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas.

Profundidade (m)	Tratamento				n
	Escarificador	P. Direto	Arado Disco	Enx. Rotativa	
	----- m ³ m ⁻³ -----				
0 – 0,10	0,287c	0,294b	0,272c	0,304c	40
0,10 – 0,20	0,307b	0,323a	0,312b	0,329b	40
0,20 – 0,30	0,318ab	0,316a	0,329a	0,350a	40
0,30 – 0,40	0,325a	0,310a	0,330a	0,352a	40
	dms = 0,013 m ³ m ⁻³	dms = 0,010 m ³ m ⁻³	dms = 0,013 m ³ m ⁻³	dms = 0,013 m ³ m ⁻³	

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%; n: número de observações.

Os valores significativamente menores de umidade volumétrica foram observados na camada superficial do solo (0,0 a 0,10 m) para todos os tratamentos avaliados.

A variação de RSP e a sua distribuição por sistema de preparo do solo e profundidade estão representadas na Figura 19 e no “Box-plot” da Figura 20, cujas estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 22A. Esses resultados se referem à determinação realizada antes das operações de preparo do solo.

Nos tratamentos conservacionistas, a hipótese de normalidade não é rejeitada para este atributo do solo no sistema de preparo escarificador nas profundidades de 0,05; 0,10; 0,35; 0,40; 0,45 e 0,50 m, enquanto para o sistema de manejo plantio direto, a distribuição normal foi verificada nas profundidades 0,10; 0,15; 0,25 e 0,45 m.

No sistema de preparo do solo convencional com arado de disco, verificou-se que nas profundidades de 0,05; 0,10; 0,15 e 0,50 m a hipótese de normalidade não foi rejeitada, enquanto para o tratamento enxada rotativa, isso ocorreu a 0,15; 0,40 e 0,50 m.

A maior amplitude interquartílica foi observada para o tratamento escarificador a 0,25 e 0,30 m de profundidade. Esse fato está associado à maior variabilidade das leituras de umidade volumétrica do solo nesta profundidade (Tabela 19A), conforme discutido anteriormente, o que demonstra a forte influência da umidade nos resultados de RSP.

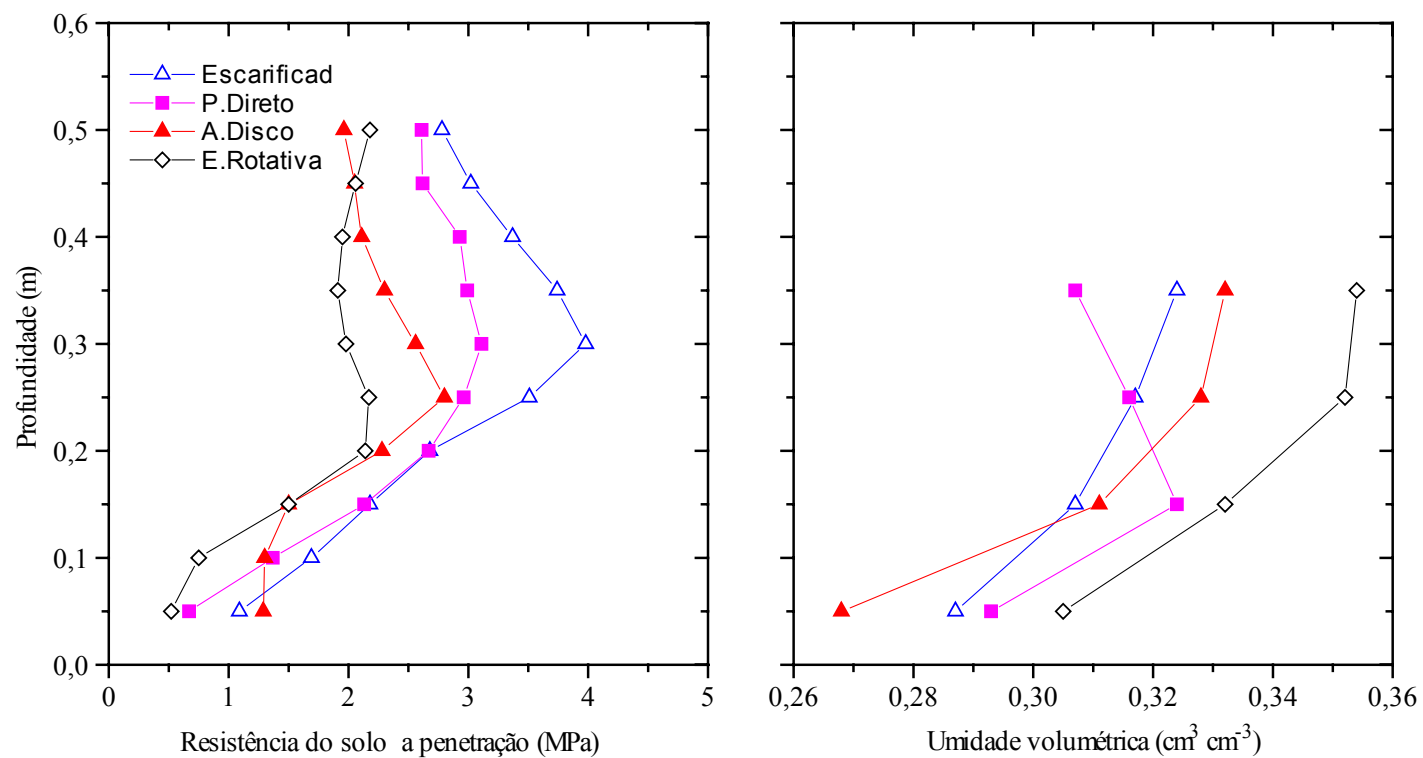


Figura 19. Variação da resistência do solo à penetração e umidade antes das operações de preparo, para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

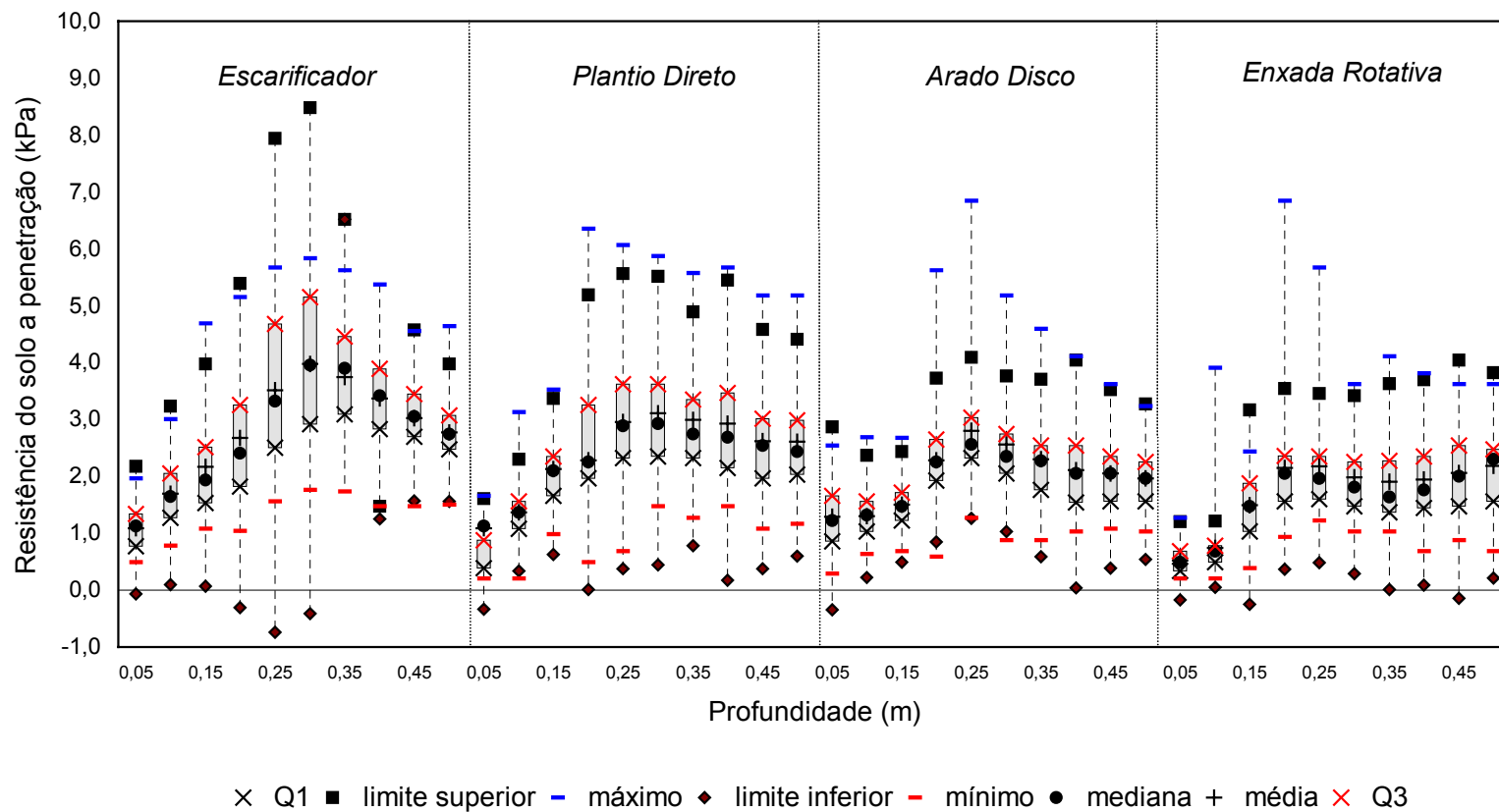


Figura 20. Gráfico “Box plot” dos valores de resistência do solo a penetração para os sistemas de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, determinados em Latossolo vermelho, em Campinas – SP no ano de 1999.

Corroboram tal afirmação os menores valores de coeficiente de variação e amplitude interquartilica para densidade do solo observados no tratamento escarificador na profundidade de 0,20 a 0,30 m (Tabela 3A).

A medida do coeficiente de variação oscilou, em geral, entre 30 e 40% e com raras exceções, saiu dessa faixa, o que permite classificar a resistência do solo à penetração como de variabilidade média para alta, segundo Warrick (1998).

Resultados de resistência do solo à penetração do solo tem apresentado ampla gama de variabilidade e de distribuição de frequência nos diferentes trabalhos pesquisados na literatura. Existe ampla diversidade das condições de amostragem de RSP, como demonstra a literatura avaliada. Essas condições interferem no resultado final, dificultando a identificação de tendências consistentes e comparações. Dentre essas condições, destacam-se as seguintes: *umidade* no momento da amostragem (Utset & Cid, 2001); a *época da coleta de dados*, que pode ser logo em seguida ao preparo (Maia, 1999), no florescimento ou na formação de vagens (Tavares Filho et al., 2001, Wutke et al., 2000, De Maria et al., 1999, Stone & Silveira, 1999) ou, ainda, após a colheita (Castro et al., 1995, Grant & Lafond, 1993); *local da amostragem na parcela*, que pode ser na linha da cultura (Beutler et al., 2001, Silva et al., 2000) ou entre linhas (Gómez et al., 1999, Taboada et al., 1998); *distribuição espacial dos pontos de amostragem*, os quais podem-se distribuir homogeneamente em malha (Utset & Cid, 2001, Maia, 1999) ou de maneira casualizada (Tavares Filho et al., 2001); e, por fim, o *tipo de equipamento e o método utilizados*, como, por exemplo, penetrômetro de impacto (Tavares Filho et al., 2001, Pedrotti et al., 2001b, De Maria et al., 1999, Stone & Sileira, 1999, Castro, 1995), penetrógrafo eletrônico, com velocidade controlada manual (Maia, 1999) ou mecanicamente (Imhoff et al., 2001), e, ainda, penetrógrafo com controle manual de velocidade (Lucarelli, 1997).

Pelos motivos apresentados, encontram-se resultados de RSP com coeficiente de variação indicando *variabilidade baixa* (De Maria et al., 1999), *variabilidade de baixa a média*, dependendo da profundidade (Castro, 1995) ou condição de umidade do solo (Utset & Cid, 2001), *variabilidade média* (Arzeno, 1990), *variabilidade de média a alta* (Maia, 1999) e *variabilidade alta* (Bertol et al., 2001), segundo a classificação de Warrick (1998).

A distribuição de frequência dos dados de RSP é variável e dependente de fatores, como a umidade do solo no momento da coleta.

Souza et al. (2001) avaliaram a resistência do solo à penetração em Latossolo vermelho distrófico cultivado com plantio direto. Os valores de coeficiente de variação para as camadas do solo de 0,00 a 0,05 m e de 0,15 a 0,20 m foram de 32,1 e 21,0% respectivamente. Dentre os atributos medidos, o da RSP apresentou uma das maiores variabilidades. Os dados seguiram uma distribuição log-normal, assim como a umidade no momento da amostragem.

Utset & Cid (2001) avaliaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração num solo argiloso em Cuba, na camada de 0,20 a 0,30 m de profundidade, sob condições secas do solo (antes da irrigação) assim como 2 e 24h após a irrigação, em área manejada com sistema convencional (uma aração com arado de disco até 0,25 a 0,30 m de profundidade e duas gradagens a 0,30 a 0,35 m de profundidade).

A resistência do solo à penetração apresentou uma distribuição normal para a condição de solo seco e 24h após a redistribuição de água aplicada pela irrigação. Todavia, o coeficiente de variação alterou-se notavelmente de acordo com a umidade do solo, sendo de 25,5% em condições secas e de 7,2%, sob condições úmidas.

Para a comparação de médias de resistência do solo à penetração, o critério do teste de Wilks (Tabela 23A, no anexo) rejeita as hipóteses de nulidade ao nível α de 0,05, mostrando que há diferença entre sistemas de preparo de solo, entre profundidades e que os efeitos da interação profundidade *versus* sistema de preparo do solo não são nulos, mostrando, ainda, que a diferença entre sistema de preparo do solo está associada a efeitos de profundidades. Além disso, como o nível de significância de rejeição observado do teste é bastante baixo (0,01%), podem-se aceitar os resultados da ANOVA (Tabela 24A, dos anexos) e os do teste subsequente, o de comparações de médias.

Avaliando-se a variação de resistência à penetração por profundidade constante da Tabela 6, observa-se que os tratamentos escarificador e plantio direto foram os que apresentaram os maiores valores de RSP em todas as profundidades avaliadas, com exceção da profundidade de 0,05 m.

Tabela 6. Comparação entre médias da variável resistência do solo à penetração dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%.

Tratamento	Profundidade (m)										n
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	
	----- MPa -----										
Escarif.	1,09a	1,69a	2,18a	2,68a	3,51a	3,98a	3,74a	3,37a	3,02a	2,78a	40
P. Direto	0,67b	1,37b	2,13a	2,67a	2,96b	3,11b	2,99b	2,93b	2,63b	2,61a	40
A. Disco	1,29a	1,30b	1,50b	2,28ab	2,80b	2,56c	2,30c	2,11c	2,05c	1,96b	40
Enx.Rot.	0,52c	0,75c	1,50b	2,14b	2,17c	1,98d	1,91c	1,95c	2,06c	2,18b	40
	dms= 0,17 MPa	dms= 0,22 MPa	dms= 0,29 MPa	dms= 0,45 MPa	dms= 0,49 MPa	dms= 0,45 MPa	dms= 0,40 MPa	dms= 0,37 MPa	dms= 0,33 MPa	dms= 0,32 MPa	

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações

Esse comportamento é reflexo do teor de umidade do solo, pois na camada de 0 a 0,10 m, o sistema de preparo arado de disco apresentou valores significativamente inferiores de umidade do solo (Tabela 19A), enquanto nas demais profundidades, alternavam-se o escarificador e o plantio direto.

Os tratamentos conservacionistas alcançaram o seu máximo valor de resistência à penetração na profundidade de 0,30 m, enquanto os sistemas de preparo do solo arado de disco e enxada rotativa alcançaram-no a 0,25 m de profundidade, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7. Comparação de médias de resistência do solo à penetração por profundidade para cada sistema de preparo do solo, pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 5%.

Profundidade (m)	Tratamento				n
	Escarificador	P. Direto	Arado Disco	Enx. Rotativa	
	----- MPa -----				
0,05	1,09g	0,67e	1,29d	0,52c	40
0,10	1,69f	1,37d	1,30d	0,75c	40
0,15	2,18e	2,13c	1,50d	1,50b	40
0,20	2,68d	2,67b	2,73bc	1,95a	40
0,25	3,51bc	2,96ab	2,80a	2,06a	40
0,30	3,98a	3,11a	2,56ab	1,98a	40
0,35	3,74ab	2,99ab	2,30b	2,14a	40
0,40	3,37bc	2,93ab	2,11bc	2,17a	40
0,45	3,02cd	2,63b	2,05bc	1,91a	40
0,50	2,78d	2,61b	1,96c	2,18a	40
	dms = 0,40 MPa	dms = 0,40 MPa	dms = 0,40 MPa	dms = 0,31 MPa	

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5%, dms: diferenças mínimas significativas, n: número de observações

Justifica-se essa variação em função da profundidade de trabalho do implemento correspondente ao sistema de preparo avaliado. Portanto, a enxada rotativa e o arado de disco, que atuam a 0,18 e 0,25 m respectivamente, apresentaram seu máximo valor por volta de 0,25 m, pois abaixo da profundidade de trabalho, o solo não revolvido sofre a pressão do implemento formando o chamado pé-de-arado.

O arado escarificador revolve o solo mais profundamente, por volta de 0,30 m, o que gera valores de resistência mais elevados nesta profundidade.

Comportamento semelhante foi observado por Stone & Silveira (1999) na comparação entre grade aradora, cuja profundidade de trabalho foi mais superficial, e arado de aiveca, ou seja, houve variação da resistência à penetração ao longo do perfil.

A resistência do solo à penetração foi o atributo físico mais afetado por implementos agrícolas, especialmente em subsuperfície, segundo estudo realizado por Lucarelli (1997), apresentando-se mais elevada nos tratamentos de maior mobilização, ou seja, grade aradora, arado de disco e enxada rotativa.

Conforme Lucarelli (1997), esses tratamentos, por terem ação cortante no solo, provocam uma camada subsuperficial compactada logo abaixo do implemento, deixando a parte superior bem desestruturada.

Os máximos valores encontrados variaram de 2,18 a 3,98 MPa, enquanto a média para todo o perfil variou de 1,72 a 2,80 MPa, estando numa faixa considerada como restritiva para o crescimento radicular por alguns autores como Grant & Lafond (1993).

A RSP ao longo do perfil (Figura 21) apresentou algumas variações durante a segunda amostragem realizada nos locais de coleta das raízes do feijoeiro, na colheita, mesma época adotada por Castro (1995) e Grant & Lafond (1993).

Os resultados da variação de umidade do solo durante o segundo ciclo de medições de resistência do solo à penetração, são apresentados na Tabela 8.

O critério do teste de Wilks (Tabela 25A) mostra que não há efeito significativo entre os sistemas de preparo do solo e para a interação sistema de preparo do solo e profundidade, havendo somente diferença entre profundidades na avaliação da umidade em base peso. A análise de variância encontra-se discriminada na Tabela 26A dos anexos.

Tabela 8. Comparação entre médias da variável umidade em base peso dos sistemas de preparo por profundidade em Latossolo vermelho na época da colheita.

Tratamento	Profundidade (m)					n
	0 – 0,10	0,10 – 0,20	0,20 – 0,30	0,30 – 0,40	0 – 0,40	
	----- kg kg ⁻¹ -----					
Escarificador	0,220a	0,222a	0,234a	0,253a	0,267a	6
Arado Disco	0,228a	0,227a	0,236a	0,254a	0,269a	6
Enx. Rotativa	0,227a	0,236a	0,253a	0,262a	0,274a	6
	dms=kg kg ⁻¹	dms=	dms=	dms=	dms=	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações.

A umidade do solo foi crescente em profundidade para todos os tratamentos avaliados, havendo um paralelismo nas curvas (Figura 21) principalmente entre os tratamentos escarificador e arado de disco. O sistema de preparo enxada rotativa apresentou valores superiores de umidade do solo, com exceção da camada de 0 a 0,10 m, onde o tratamento arado de disco se destacou. A influência da umidade do solo no ensaio de RSP foi menos pronunciada no segundo ciclo de medições, tornando os resultados mais comparáveis.

O critério do teste de Wilks (Tabela 27A) mostra que não há efeito significativo entre sistemas de preparo do solo e para a interação profundidade *versus* sistema de preparo do solo, havendo somente diferenças significativas entre profundidades. Os resultados da análise de variância (ANOVA) encontram-se na Tabela 28A. As médias de resistência do solo à penetração foram superiores àquelas alcançadas na primeira amostragem para os tratamentos arado de disco e enxada rotativa, e inferiores àquelas observadas no sistema escarificador, conforme a Tabela 9.

O tratamento com as maiores médias foi o sistema convencional arado de disco seguido do escarificador e enxada rotativa que atingiram praticamente o mesmo valor, apesar da maior umidade apresentada pelo sistema enxada rotativa.

Os valores máximos observados variaram de 2,6 a 3,5 MPa, ou seja, dentro dos limites considerados restritivos ao desenvolvimento das raízes por Grant & Lafond (1993).

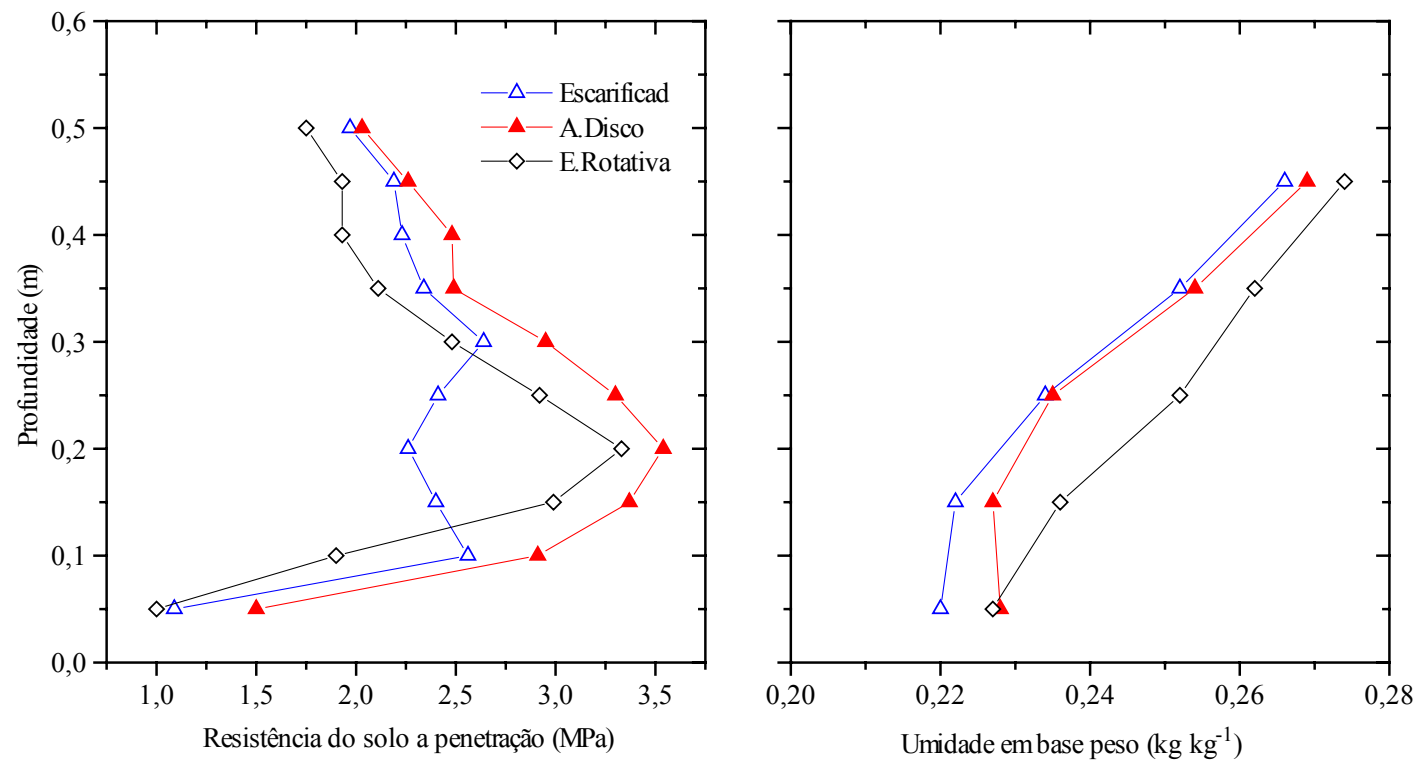


Figura 21. Variação da resistência do solo à penetração e umidade, na época da colheita, para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Tabela 9. Comparação entre médias da variável resistência do solo à penetração dos sistemas de preparo por profundidade pelo teste de diferenças mínimas significativas e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%, na época da colheita.

Tratamento	Profundidade (m)										n
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	
	----- MPa -----										
Escarif.	1,09a	2,02a	2,40a	2,26a	2,41a	2,64a	2,34a	2,24a	1,94a	1,36a	6
A. Disco	1,50a	2,37a	3,37a	3,54a	3,30a	2,96a	2,49a	2,48a	2,26a	1,63a	6
Enx.Rot.	1,00a	1,36a	2,99a	3,33a	2,92a	2,48a	2,11a	1,93a	2,19a	1,57a	6
	dms= 0,51 MPa	dms= 0,76 MPa	dms= 0,75 MPa	dms= 0,96 MPa	dms= 0,91 MPa	dms= 0,61 MPa	dms= 0,50 MPa	dms= 0,63 MPa	dms= 0,50 MPa	dms= 0,56 MPa	

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações.

A profundidade em que esses valores máximos ocorreram varia de acordo com o tratamento, conforme pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10. Médias de resistência do solo à penetração por profundidade para cada sistema de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 95%.

Profundidade	Tratamento			
	Escarificador	Arado Disco	Enx. Rotativa	
0,05	1,09c	1,50f	1,00e	6
0,10	2,56a	2,91bcd	1,90cd	6
0,15	2,40ab	3,37ab	2,99ab	6
0,20	2,26ab	3,54a	3,33a	6
0,25	2,41ab	3,30ab	2,92ab	6
0,30	2,64a	2,96abc	2,48bc	6
0,35	2,34ab	2,49cde	2,11cd	6
0,40	2,24ab	2,48cde	1,93cd	6
0,45	2,19ab	2,26e	1,94cd	6
0,50	1,97b	2,03ef	1,75d	6
	dms = 0,55 MPa	dms = 0,67 MPa	dms = 0,67 MPa	

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5%, dms: diferenças mínimas significativas, n: número de observações.

Todavia, valores restritivos de resistência à penetração são arbitrários, não havendo um consenso sobre limites a serem adotados, pois o desenvolvimento de uma cultura é influenciado por uma grande diversidade de fatores. Além disso, a resistência à penetração é um atributo dinâmico e que varia tanto espacialmente quanto temporalmente, sujeita à influência dos ciclos de secamento e molhamento do solo, conforme demonstrado por Utset & Cid (2001).

Tavares Filho et al. (2001) relataram que valores de resistência do solo à penetração superiores a 3,5 MPa não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, porém influenciaram a sua morfologia sob condições de campo. Já Rosolem et al. (1999), em experimento realizado com plântulas de milho cultivadas em tubos de PVC durante 48h,

verificaram que resistências do solo à penetração da ordem de 1,3 MPa reduziram pela metade o crescimento das raízes seminais adventícias do milho.

Resultados relacionados a leguminosas como a ervilhaca, durante experimento desenvolvido em vasos sob condições de casa de vegetação por Muller et al. (2001), mostraram grande redução na matéria seca de raízes na camada compactada e na inferior, em face do aumento da densidade do solo de 1,31 a 1,70 Mg m⁻³, e de sua correspondência com uma variação de resistência do solo à penetração da ordem de 0,10 a 1,34 MPa.

Nos tratamentos arado de disco e enxada rotativa, os valores máximos foram atingidos na profundidade de 0,20 m, estando 0,05 m mais próximo à superfície em relação à primeira amostragem realizada antes das operações de preparo (Tabela 8). Já para o tratamento escarificador, a profundidade na qual se alcançou o máximo valor, manteve-se a 0,30 m, concordando com o que fôra descrito por Lucarelli (1997).

Para a cultura do feijoeiro, valores de resistência do solo à penetração atingiram limites superiores a 3,50 MPa na época do florescimento e a 0,15m de profundidade, para o tratamento com grade aradora, em experimento realizado por Stone & Silveira (1999). Quanto às diferenças significativas entre os tratamentos, elas só ocorreram na camada superficial do solo, mas isso não prejudicou a produtividade. As baixas tensões de água no solo ao longo do ciclo devem ter reduzido a resistência do solo à penetração e sua influência sobre o desenvolvimento do sistema radicular, segundo os autores.

Wutke et al. (2000) registrou médias máximas de resistência do solo à penetração de 5,0 a 7,0 MPa, entre as profundidades de 0,20 a 0,35 m, para o feijoeiro irrigado sob diferentes rotações de culturas em três anos de ensaio, porém, a profundidade efetiva da cultura teve um desempenho semelhante ao de outros autores como Pires (1991) e Stone & Silveira (1999). As baixas tensões de água no solo ao longo do ciclo e a conseqüente redução da impedância também foram apontadas como justificativa para o desenvolvimento radicular não ter sido severamente afetado.

A Figura 22 apresenta a distribuição do sistema radicular, em profundidade, dos tratamentos alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa.

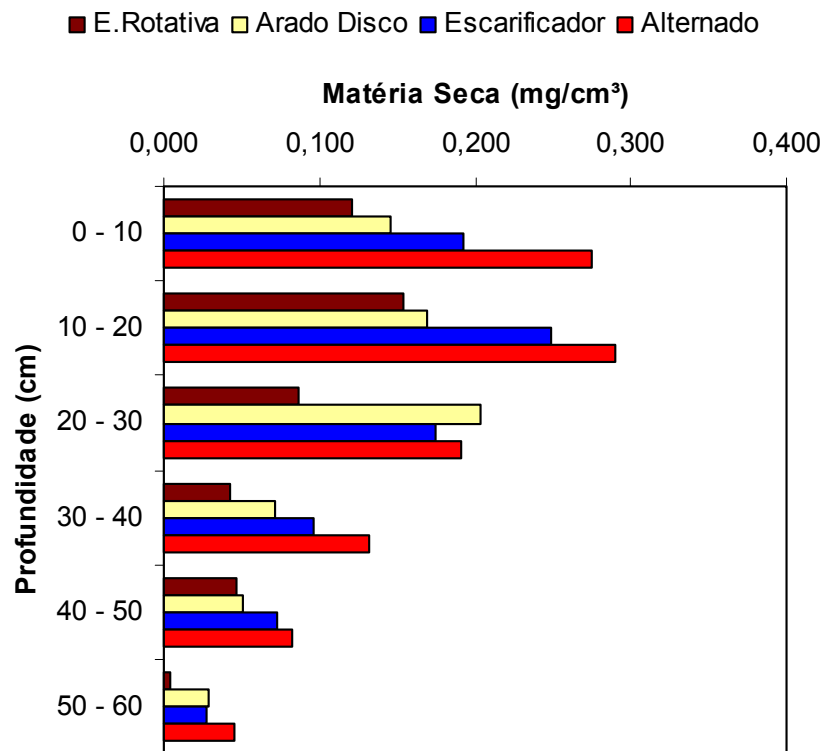


Figura 22. Distribuição do sistema radicular do feijoeiro no Latossolo vermelho submetido aos tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Incluiu-se o tratamento alternado nesta análise, objetivando-se ter uma referência de cultura sem restrição hídrica durante o ciclo e mantida sob potenciais elevados de água no solo.

Pelo teste de Wilk (Tabela 29A), observa-se a não significância entre sistemas de preparo do solo quanto ao efeito médio de densidade de raízes, embora pela ANOVA (Tabela 30A) essa hipótese tenha sido rejeitada. Observa-se, também, a não significância entre os efeitos médios da densidade de raízes nas interações profundidade *versus* sistema de preparo do solo, diferindo apenas entre profundidades e, nesse caso, a densidade de raízes pode até ser representada pela média geral por profundidade.

Os resultados de densidade de raízes encontram-se na Tabela 11 e demonstram a superioridade do tratamento alternado em todas as profundidades devido, provavelmente, ao suprimento de água diferenciado em relação ao dos demais.

Comparando-se os tratamentos com mesmo manejo de irrigação, observa-se uma superioridade do tratamento escarificador em todas as profundidades com exceção da camada de 0,20 a 0,30 m, onde se destaca o tratamento convencional com arado de disco.

Nessa tabela, observa-se que o sistema radicular do feijoeiro concentrou-se na camada de 0,10 a 0,20 m para todos os sistemas de preparo, vindo a seguir a camada de 0,0 a 0,10 m e decaindo até a profundidade de 0,50 a 0,60 m. Essa concentração equivale a 55,6; 54,3 e 60,5% das raízes dos sistemas alternado, escarificador e enxada rotativa, respectivamente, indicando uma distribuição de raízes mais próxima à superfície no sistema enxada rotativa, conforme a Figura 23.

A exceção foi o sistema convencional com arado de disco, cuja densidade de raízes predominou na faixa de profundidade de 0,20 a 0,30 m e, em seguida, na de 0,1 a 0,2 m. Stone & Pereira (1994) também observaram maior densidade radicular para diferentes cultivares do feijoeiro, incluindo a cv. Carioca, na camada de 0 a 0,20 m, onde se concentrou mais de 70% das raízes.

Considerando-se a camada do solo de 0 a 0,30 m, observa-se que o sistema de preparo enxada rotativa continua apresentando uma concentração relativa de raízes superior à dos demais tratamentos, alcançando 79,4%, seguido do sistema arado de disco, escarificador e alternado, os quais apresentaram 77,6%; 75,9% e 74,4% respectivamente.

Tabela 11. Comparação entre médias da densidade de raízes por profundidade para um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Profundidade	Sistema de Preparo do Solo				n
	Alternado	Escarificador	Arado de Disco	Enxada Rotativa	
m	----- mg cm ⁻³ -----				
0 – 0,1	0,275aAB ± 0,005	0,192aA ± 0,003	0,145aAB ± 0,001	0,122aAB ± 0,001	6
0,1 – 0,2	0,290aA ± 0,008	0,249aA ± 0,001	0,169aA ± 0,001	0,154aA ± 0,001	6
0,2 – 0,3	0,191aABC ± 0,001	0,174aAB ± 0,001	0,204aA ± 0,002	0,086aBC ± 0,000	6
0,3 – 0,4	0,132aBCD ± 0,001	0,096aBC ± 0,000	0,071aBC ± 0,000	0,042aCD ± 0,000	6
0,4 – 0,5	0,083aCD ± 0,000	0,073aC ± 0,000	0,050aC ± 0,000	0,047aCD ± 0,000	6
0,5 – 0,6	0,046aD ± 0,001	0,027aC ± 0,000	0,029aC ± 0,001	0,005aD ± 0,000	6
	dms = 0,145 mg cm ⁻³	dms = 0,047 mg cm ⁻³	dms = 0,078 mg cm ⁻³	dms = 0,060 mg cm ⁻³	6
	CV = 72,5%	CV = 53,9%	CV = 59,3%	CV = 67,1%	
Total	1,016a ± 0,021	0,811ab ± 0,05	0,669ab ± 0,004	0,456b ± 0,002	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5%, dms: diferenças mínimas significativas, CV: coeficiente de variação; n: número de observações

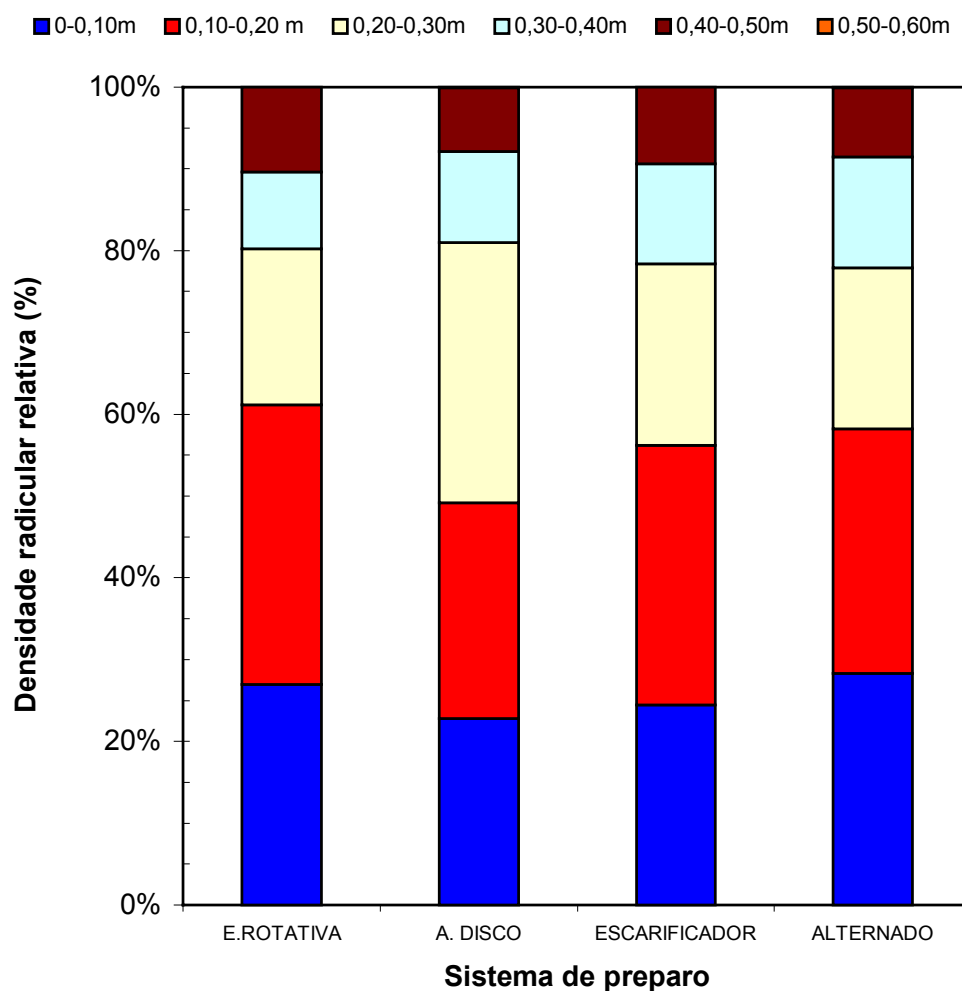


Figura 23. Distribuição relativa do sistema radicular do feijoeiro no florescimento, nos sistemas de preparo do solo enxada rotativa, arado de disco, escarificador e alternado, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Esse fato sugere que os sistemas de preparo do solo influenciaram a distribuição radicular do feijoeiro, pois nos tratamentos cuja profundidade de trabalho foi menor, as raízes se concentraram mais próximas à superfície.

Stone & Silveira (1999) obtiveram resultados semelhantes encontrando uma distribuição do sistema radicular, em profundidade, mais uniforme no arado aiveca devido ao fato de sua profundidade de trabalho ter sido de 0,30 m. No sistema grade aradora, cuja mobilização do solo foi até a profundidade de 0,10 a 0,15 m, esses autores verificaram que cerca de 60% do sistema radicular concentrou-se nos primeiros 0,10 m de profundidade.

Wutke et al. (2000) avaliaram o desenvolvimento radicular do feijoeiro durante três anos, no período de 1993 a 1995, e observaram valores individuais de densidade radicular por profundidade e totais por tratamento maiores nos anos em que se utilizou o arado de aiveca no preparo do solo, em 1994 e 1995. No ano de 1994, aquele no qual a cultura apresentou melhor enraizamento, a camada adensada localizou-se de 0,30 a 0,40 m, enquanto no ano de 1995, quando o feijoeiro teve a sua segunda melhor distribuição de raízes, a camada compactada localizou-se a 0,25-0,35 m.

No ano de 1993, o solo foi preparado com arado de disco e a camada compactada apresentou-se mais próxima à superfície, ou seja, a 0,15-0,35 m; nessa condição, o feijoeiro teve o seu pior desempenho no que se refere à densidade de raízes.

A melhor distribuição do sistema radicular e a superioridade em termos de densidade radicular do sistema escarificador não estão associadas à densidade do solo e, provavelmente, tampouco aos valores de resistência à penetração, pois esse tratamento foi aquele que apresentou as médias estatisticamente superiores em todas as profundidades avaliadas para esses dois atributos do solo (Tabelas 2 e 6). Todavia, alguns autores têm indicado a influência da densidade do solo na redução da densidade de raízes do feijoeiro (Moraes et al., 1998), e outros verificaram que maiores valores de resistência e densidade não determinaram, necessariamente, redução na densidade de raízes para leguminosas (De Maria et al., 1999)

Moraes et al. (1998) realizaram um experimento em condições de casa de vegetação para avaliar a influência de diferentes densidades e porosidades de camadas subsuperficiais, entre 0,18 e 0,20 m, no crescimento de raízes de plantas do feijão. Os valores de densidade na camada compactada variaram de 1,00 a 1,20 Mg dm⁻³, o que reduziu em aproximadamente 9%

a macroporosidade e elevou em torno de 3% a microporosidade no Latossolo roxo. Os autores apontam um aumento do comprimento de raízes na camada superficial e redução na camada abaixo da compactada à medida que se eleva a densidade do solo para os limites de densidade avaliados neste trabalho.

De acordo com De Maria et al. (1999), o valor de densidade ($1,21 \text{ Mg m}^{-3}$) e o de RSP ($2,09 \text{ MPa}$), na camada de 0,1 a 0,2 m, poderiam estar determinando a redução do crescimento das raízes da soja no sistema de preparo grade pesada.

As médias máximas de densidade observadas para o sistema escarificador e demais tratamentos avaliados superaram as descritas nesses trabalhos citados. Em uma comparação com os resultados de Moraes et al. (1998), não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos devido, provavelmente, à menor variação de densidade observada, pois no presente trabalho, esteve na faixa de $1,29$ a $1,37 \text{ kg dm}^{-3}$, correspondendo a uma variação de 6% em contraste com os 20% em Moraes et al. (1998).

Outro fator que diferencia os resultados do presente trabalho em relação aos dos anteriormente citados, refere-se à profundidade da camada adensada, que em De Maria et al. (1999) localiza-se em 0,10 a 0,20 m e, em Moraes et al. (1998), na camada de 0,18 a 0,21 m, enquanto no presente trabalho observou-se a maior densidade na profundidade de 0,20 a 0,30 m.

De Maria et al. (1999) observaram que o sistema radicular da soja foi reduzido em profundidade quando a densidade e a resistência do solo à penetração foram elevadas entre as camadas 0,10 a 0,20 m e 0,0 a 0,10 m e que os valores de RSP e densidade do solo isoladamente não puderam ser considerados como indicadores do crescimento das raízes.

Na segunda amostragem do solo, as maiores médias de resistência do solo à penetração foram mais próximas à superfície nos tratamentos convencional com arado de disco e enxada rotativa do que no sistema de preparo escarificador. Além disso, o gradiente de RSP na superfície até a profundidade de 0,20 m, nesse sistema de preparo, foi inferior ao daqueles apresentados pelos tratamentos enxada rotativa e convencional com arado de disco.

Dentre os fatores implicados, um dos que podem ter levado ao melhor desempenho do sistema de preparo escarificador foi a distribuição mais homogênea de poros nesse tipo de

sistema de preparo em relação à dos demais, o que, segundo Castro (1995) favorece o desenvolvimento radicular da cultura.

Para fins de manejo de irrigação do feijoeiro, em Latossolo vermelho, parece adequado considerar a profundidade efetiva do sistema radicular como sendo de 0,3 a 0,4 m, pois todos os sistemas concentraram mais de 80% de suas raízes na camada de 0 a 0,40 m. Abaixo dessa profundidade, ocorre uma drástica redução na distribuição percentual de raízes.

De maneira geral, os valores obtidos aproximam-se daqueles registrados por outros autores que realizaram ensaios com feijoeiro irrigado, como Pires et al. (1991), Stone & Silveira (1999), Wutke et al. (2000), para a variedade IAC Carioca, Stone & Pereira (1994) e Oliveira & Silva (1990).

Portanto, entre as propriedades físicas do solo avaliadas, observou-se que a porosidade total e a macroporosidade ao longo do perfil relacionaram-se com o melhor desenvolvimento do sistema radicular do tratamento escarificador, porém não significativo, nas diferentes profundidades avaliadas do solo. A profundidade da camada adensada e o gradiente de resistência à penetração ao longo do perfil, determinada ao final do ciclo, foram bons indicadores para o desenvolvimento radicular do feijoeiro, visto que as condições de fertilidade, umidade do solo, manejo de pragas e doenças não limitaram severamente o desenvolvimento da cultura.

4.3. Desenvolvimento da cultura

4.3.1. Altura de planta

A evolução da altura da cultura do feijoeiro ao longo do ciclo e o gráfico Box plot podem ser visualizados nas Figuras 24 e 25 respectivamente.

Na Tabela 31A dos anexos, apresenta-se o estudo da normalidade da distribuição da altura de planta por sistema de preparo do solo e data de amostragem. Para os sistemas de preparo do solo alternado e escarificador, observa-se normalidade da altura aos 17, 24, 32 e 76 DAE.

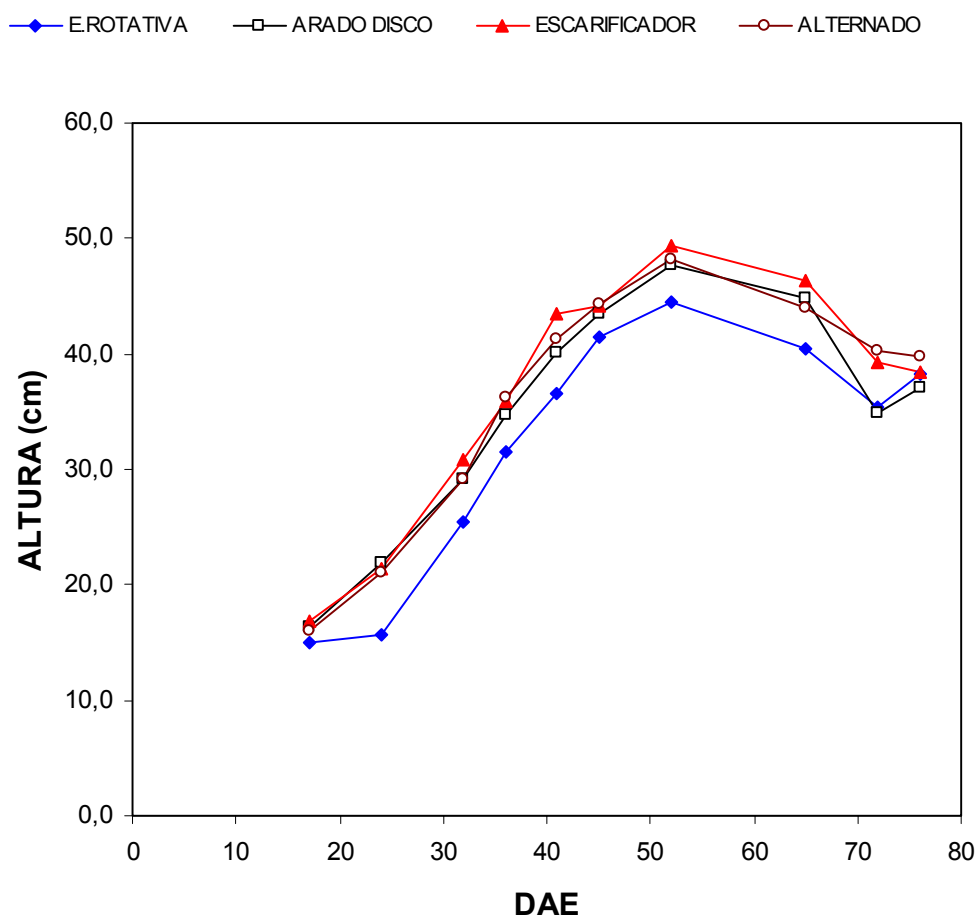


Figura 24. Altura média de planta da cultura do feijoeiro submetida aos sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas - SP, no ano de 1999.

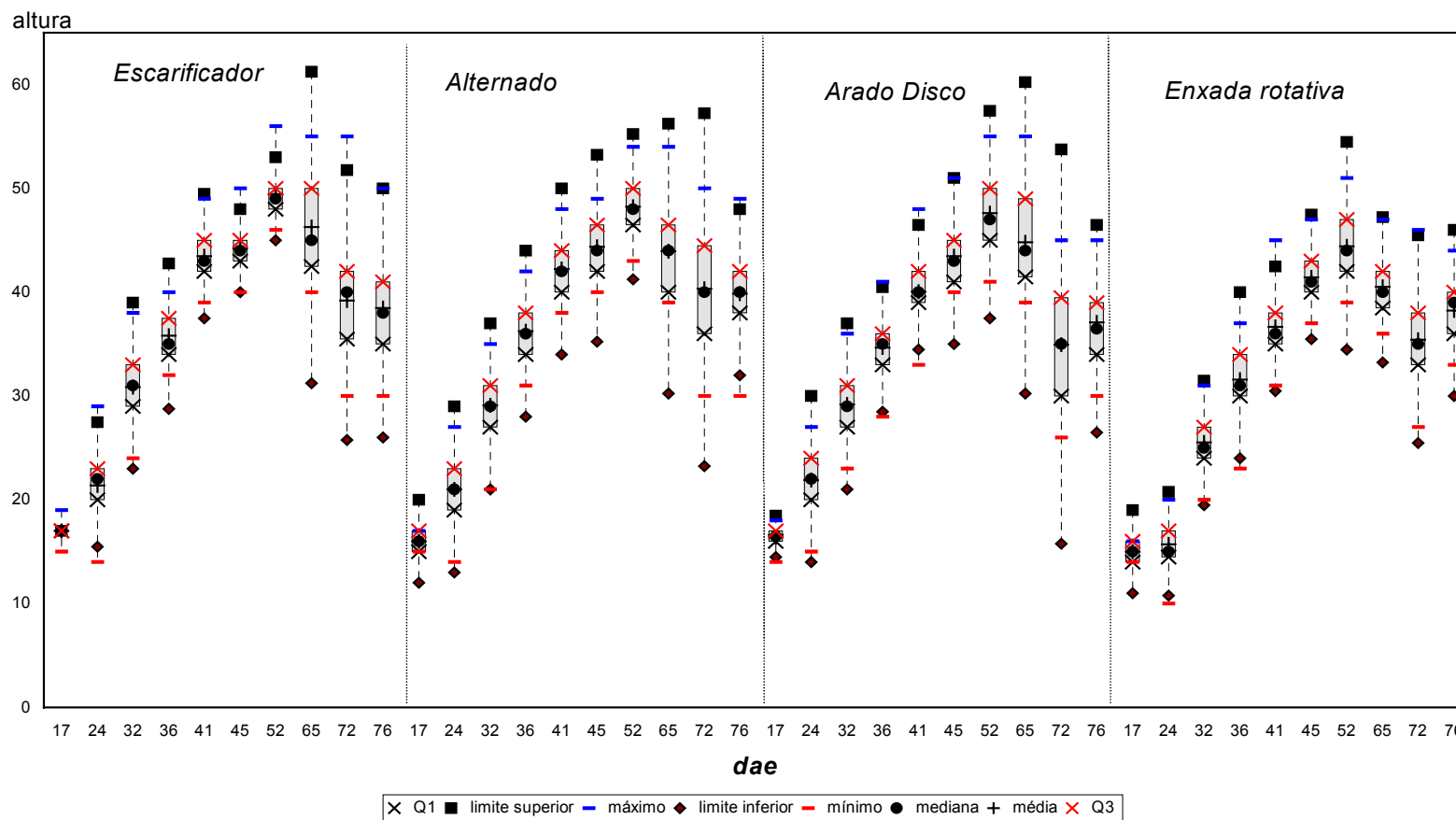


Figura 25. Gráfico Box-Plot para a altura de planta do feijoeiro cultivada sob os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Já para o tratamento convencional com arado de disco, a normalidade da altura é verificada aos 24, 32, 36, 41 e 76 DAE, enquanto para o sistema de preparo enxada rotativa, essa distribuição é encontrada aos 24, 32, 36, 41, 65 e 72 DAE.

Os maiores valores observados de amplitude interquartilica e coeficiente de variação ocorrem próximo ao final do ciclo, quando a cultura está senescente, porém com um desfolhamento não uniforme no campo.

Pelo teste de Wilks também há diferença significativa entre efeitos de sistema de preparo do solo, altura e interação sistema de preparo do solo *versus* DAE, podendo ser considerados os resultados da ANOVA (Tabela 32A dos anexos).

O parâmetro altura de planta demonstrou uma diferenciação no desempenho da cultura ao longo do ciclo do feijoeiro entre os tratamentos desenvolvidos sob o mesmo manejo de irrigação, destacando-se o tratamento escarificador seguido do arado de disco e enxada rotativa.

A comparação de médias para cada data detalha o desempenho dos tratamentos, conforme pode ser visto na Tabela 12. Nessa tabela, verificou-se que a cultura do feijoeiro na parcela referente ao tratamento escarificador alcançou os valores estatisticamente mais altos aos 17, 32, 41, 52, 65 DAE, não diferindo significativamente dos tratamentos que apresentaram as maiores médias nas datas restantes.

O segundo melhor desempenho foi observado pela cultura semeada na parcela do tratamento alternado, apesar do manejo mais favorável de irrigação, o qual apresentou alturas de planta significativamente mais elevadas aos 36, 45, 72 e 76 DAE, não diferindo dos valores estatisticamente mais altos somente aos 24 DAE.

O tratamento alternado se destaca no final do ciclo, pois sendo a variedade IAC Carioca de crescimento indeterminado, o fornecimento de água permitiu que a cultura tivesse maior duração foliar, o que interferiu, positivamente, no momento da determinação da altura da cultura. Comportamento semelhante foi observado em Medeiros et al. (2001), para essa cultivar.

Tabela 12. Comparação entre médias das variáveis de altura de planta do feijoeiro e intervalo de confiança da média, ao nível de 95%, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Tratamento	Data (Dias após a emergência)									
	17	24	32	36	41	45	52	65	72	76
	----- cm -----									
Alternado	16,0b	21,0a	29,1b	36,2a	42,2b	44,4a	48,3b	44,0b	40,4a	39,8a
Escarific.	17,0a	21,3a	30,9a	35,8a	43,5a	44,2ab	49,4a	46,3a	39,2a	38,5ab
A. Disco	16,4ab	21,9a	29,2b	34,7b	40,1c	43,5b	47,6b	44,8ab	35,0b	37,1b
Enx.Rot.	15,0c	15,7b	25,5c	31,6c	36,7d	41,5c	44,4c	40,5c	35,5b	38,3b
	dms= 0,9 cm	dms= 0,9 cm	dms= 1,0 cm	dms= 0,9 cm	dms= 0,9 cm	dms= 0,9 cm	dms= 1,1 cm	dms= 1,8 cm	dms= 1,9 cm	dms= 1,4 cm
	CV = 6,25%	CV = 12,86%	CV = 9,80%	CV = 7,59%	CV = 7,23%	CV = 5,58%	CV = 6,50%	CV = 9,04%	CV = 13,80%	CV = 9,51%

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações.

O tratamento de sistema de preparo do solo convencional com arado de disco teve o seu melhor desempenho no início do ciclo até 24 DAE, quando chegou a apresentar a média estatisticamente mais elevada, destacando-se depois, somente aos 65 DAE, quando não diferiu significativamente do tratamento escarificador. A partir dessa data, esse sistema de preparo do solo passou a apresentar o pior desempenho dentre os tratamentos avaliados, em função da senescência mais avançada, não diferindo, porém, estatisticamente do sistema enxada rotativa.

Dentre os sistemas de preparo avaliados, aquele que apresentou os valores estatisticamente menores ao longo de todo o ciclo foi o tratamento enxada rotativa.

A comparação de médias de altura de planta, obtidas nas diferentes datas, por sistema de preparo do solo é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13. Médias de altura de planta por sistema de preparo do solo, comparadas pelo teste de diferenças mínimas significativas ao nível de 95%, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Data (DAE)	Tratamento				n
	Altenado	Escarificador	Arado Disco	Enx. Rotativa	
	----- cm -----				
17	16,0h	17,0h	16,4h	15,0h	10
24	21,0g	21,4g	21,9g	15,7g	60
32	29,1f	30,9f	29,2f	25,5f	60
36	36,2e	35,8e	34,7e	31,6e	60
41	42,2c	43,5c	40,1c	36,7d	40
45	44,0b	44,2c	43,5b	41,5b	60
52	48,3a	49,4a	47,6a	44,4a	60
65	44,4b	46,3b	44,8b	40,5b	40
72	40,4d	39,2d	35,0e	35,5d	60
76	39,8d	38,5d	37,1d	38,3c	50
	dms = 1,5 cm	dms = 1,5 cm	dms = 1,6 cm	dms = 1,3 cm	
	CV = 9,02	CV = 8,84	CV = 9,67%	CV = 8,73%	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%, n: número de observações

Os valores de altura média atingiram o seu máximo aos 52 DAE, em todos os tratamentos avaliados, durante o início da formação de produção, e corresponderam a 0,44; 0,48; 0,48 e 0,49 m, para os sistemas de preparo do solo enxada rotativa, arado de disco, alternado e escarificador respectivamente. Esses valores foram significativamente mais altos em relação aos verificados nas outras datas de medição, em todos os tratamentos avaliados.

Medeiros (1996), em cultivo do feijoeiro irrigado, variedade IAC Carioca, semeado em duas densidades populacionais, obteve altura máxima variando de 0,48 a 0,50 m aos 59 DAE, também no início da formação da produção.

Outros autores têm encontrado valores superiores para essa cultivar submetida à irrigação.

Wutke (1998) obteve resultados de altura da planta variando de 0,68 a 0,70 m para o feijoeiro semeado em Latossolo roxo e submetido a diferentes tratamentos de rotação de cultura, entretanto, Bulisani & Almeida (1990) reportam que a altura do dossel do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) varia, conforme a cultivar, de 0,40 a 0,50 m. Portanto, o comportamento da cultura com relação a esse parâmetro de crescimento esteve dentro da faixa de variação esperada para a cultivar em questão.

No final do ciclo, houve uma queda acentuada na altura de planta devido ao acamamento provocado pelo aumento de peso das vagens e ao período de senescência da cultura.

Na literatura, encontraram-se poucos estudos relacionados a diferenças provocadas no desenvolvimento do feijoeiro por sistemas de preparo do solo. Dentre esses trabalhos, o parâmetro relacionado à altura de planta não tem sido freqüentemente medido.

Zaffaroni et al. (1991) avaliaram o efeito de métodos de preparo do solo sobre as características agronômicas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade não citada. A altura de planta foi um dos parâmetros mensurados pelos autores que não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos motomecanizados (plantio direto *versus* aração e gradagem).

Xu & Pierce (1998) avaliaram o desempenho da cultura do feijoeiro submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em três anos de cultivo, considerando medidas de desenvolvimento de cultura e produção. A altura foi um parâmetro que apresentou diferenças

significativas entre os tratamentos, contudo, não houve uma tendência consistente, pois os resultados foram muito dependentes das condições climáticas do ano agrícola. Dentre os sistemas avaliados, o escarificador e arado aiveca destacaram-se no primeiro ano, sendo este último e a semeadura direta os que melhor desempenho apresentaram no segundo ano, com referência à altura de planta.

As relações altamente significativas obtidas neste ensaio são as seguintes:

a) sistema de preparo do solo *alternado*:

$$H = -4,59 + 0,973 \text{ DAE} + 1,26 \times 10^{-2} \text{ DAE}^2 - 2,37 \times 10^{-4} \text{ DAE}^3 \quad n = 10 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (18)$$

b) sistema de preparo do solo *escarificador*:

$$H = 1,87 + 0,451 \text{ DAE} + 2,67 \times 10^{-2} \text{ DAE}^2 - 3,51 \times 10^{-4} \text{ DAE}^3 \quad n = 10 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (19)$$

c) sistema de preparo do solo *convencional com arado de disco*:

$$H = 3,44 + 0,342 \text{ DAE} + 2,74 \times 10^{-2} \text{ DAE}^2 - 3,51 \times 10^{-4} \text{ DAE}^3 \quad n = 10 \quad r^2 = 0,96^{**} \quad (20)$$

d) sistema de preparo do solo *enxada rotativa*:

$$H = 0,341 + 0,395 \text{ DAE} + 2,39 \times 10^{-2} \text{ DAE}^2 - 3,05 \times 10^{-4} \text{ DAE}^3 \quad n = 10 \quad r^2 = 0,93^{**} \quad (21)$$

A exemplo do que ocorreu na discussão sobre parâmetros físico-hídricos de solo, resultados que consistentemente indiquem para o melhor desempenho da cultura devido à ação de sistema específico de preparo do solo não têm sido observados na literatura.

4.3.2. Porcentagem de cobertura vegetal

A porcentagem de cobertura vegetal é um importante parâmetro de desenvolvimento da cultura e de interesse tanto para a área de conservação de solos, pela sua relação com a erosão de terras agrícolas, quanto para a irrigação, pela sua relação com o consumo de água pelas plantas. Alguns autores afirmam que o coeficiente de cultura do feijoeiro atinge um valor máximo 1,0 a 1,2, dependendo das condições atmosféricas, a partir do momento em que há um recobrimento de 80% do solo pelas plantas (Medeiros et al., 2000, Medeiros et al., 2001, Allen et al., 1998 entre outros).

A Figura 26 apresenta a evolução da porcentagem de cobertura vegetal dos tratamentos investigados. Observa-se que os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, arado de disco e escarificador tiveram um desempenho semelhante e relativamente superior ao do sistema de preparo por enxada rotativa, como verificado na altura de planta.

A cobertura vegetal atingiu o seu valor máximo de 100% aos 45 DAE, nos tratamentos de preparo do solo alternado e escarificador, enquanto para os sistemas arado de disco e enxada rotativa, isso ocorreu aos 47 e 51 DAE respectivamente. Essa época corresponde ao período entre o início do florescimento, aos 40 DAE, e à formação da produção, aos 49 DAE, similar aos resultados de outros trabalhos com a cultura do feijoeiro (Arruda, 1984, Medeiros et al., 2000).

As relações altamente significativas obtidas neste ensaio são as seguintes:

a) sistema de preparo do solo *alternado*:

$$\%CVeg = -123,63 + 9,22 \text{ DAE} - 1,15 \times 10^{-1} \text{ DAE}^2 + 4,09 \times 10^{-4} \text{ DAE}^3 \quad n = 9 \quad r^2 = 0,96^{**} \quad (22)$$

b) sistema de preparo do solo *escarificador*:

$$\%CVeg = 69,04 - 5,76 \text{ DAE} + 2,49 \times 10^{-1} \text{ DAE}^2 - 2,34 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (23)$$

c) sistema de preparo do solo *convencional com arado de disco*:

$$\%CVeg = 71,44 - 6,12 \text{ DAE} + 2,57 \times 10^{-1} \text{ DAE}^2 - 2,38 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,95^{**} \quad (24)$$

d) sistema de preparo do solo *enxada rotativa*:

$$\%CVeg = 67,01 - 6,53 \text{ DAE} + 2,66 \times 10^{-1} \text{ DAE}^2 - 2,42 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 10 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (25)$$

4.3.3. Índice de Área Foliar

Os resultados da variação do índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro, para os tratamentos de sistema de preparo do solo investigados são apresentados na Figura 27.

O índice de área foliar é um parâmetro dependente da variedade, das condições climáticas e ambientais, além da densidade de plantio.

Selecionaram-se, portanto, resultados de índice de área foliar com base em trabalhos com feijoeiro irrigado, para uma comparação com o desempenho da cultura.

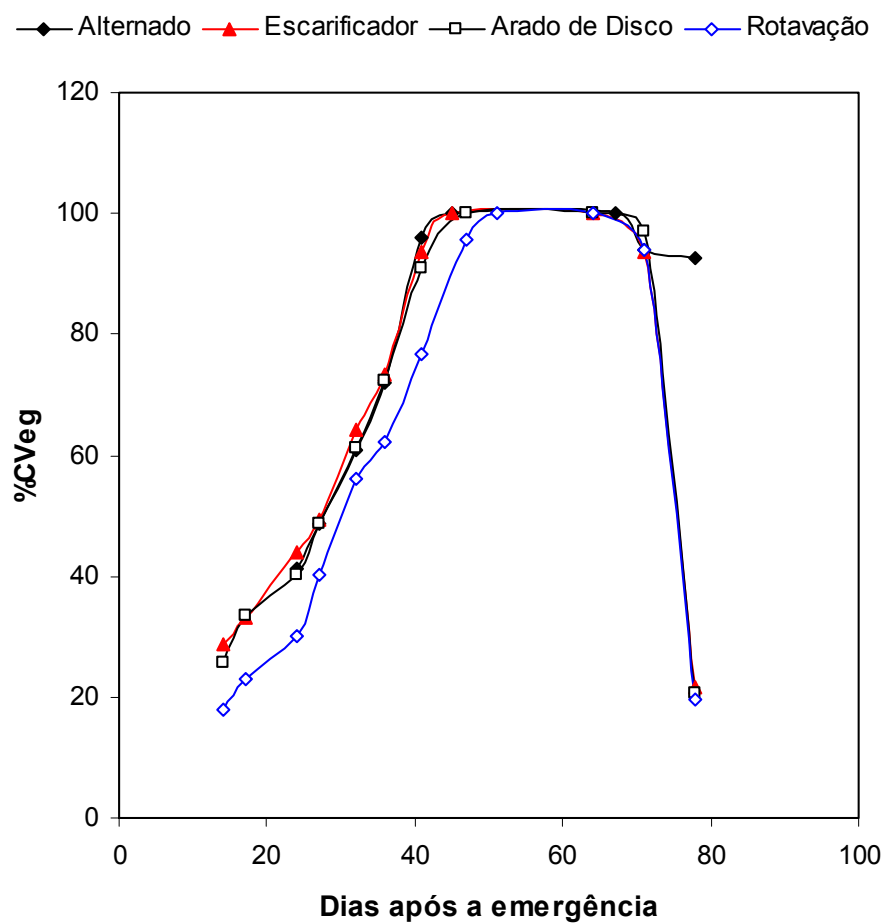


Figura 26. Porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) da cultura do feijoeiro submetido aos sistemas de preparo do solo, em Campinas-SP, no ano de 1999.

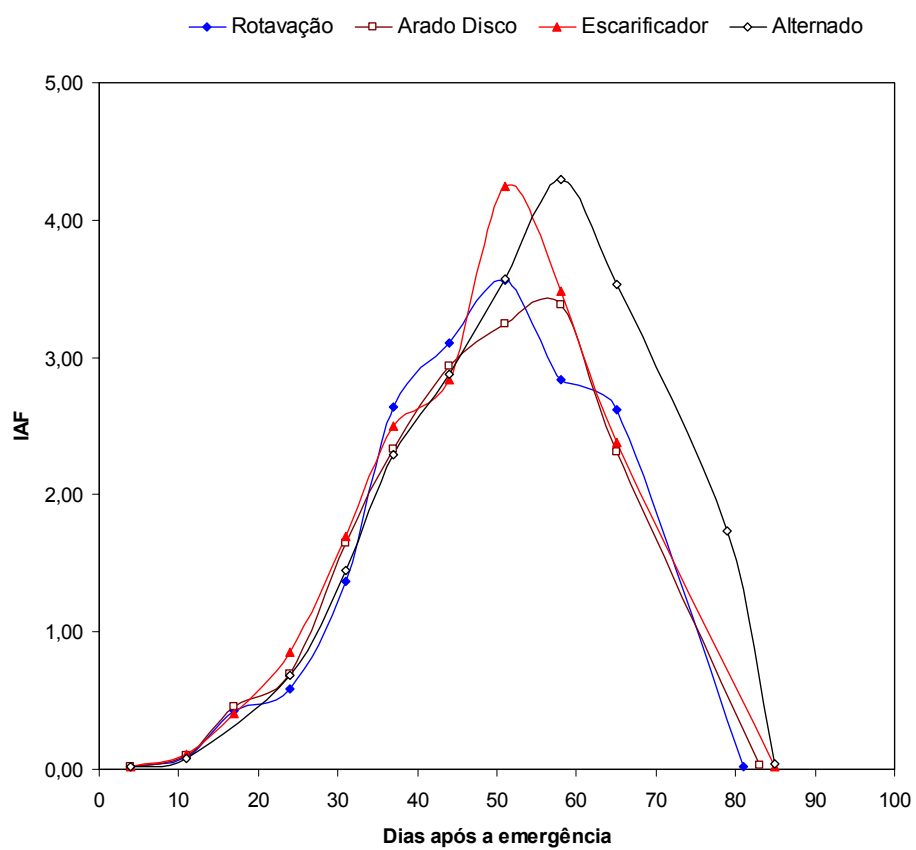


Figura 27. Índice de área foliar (IAF) da cultura do feijoeiro submetido aos sistemas de preparo do solo, em Campinas – SP, no ano de 1999.

A variação do índice de área foliar seguiu a tendência mostrada nos outros parâmetros de desenvolvimento de cultura avaliados, observando-se uma superioridade do tratamento escarificador quando comparado aos demais, com manejo de água semelhante.

Os maiores valores de índice de área foliar (IAF) foram de 3,4 e 4,2 para os sistemas de preparo convencional com arado de disco e escarificador, respectivamente, atingidos aos 51 DAE, mesma época em que a cultura do feijoeiro alcançou sua máxima altura (Tabela 12), e de 3,6 para o sistema enxada rotativa, aos 58 DAE. O tratamento correspondente ao sistema de preparo alternado atingiu um IAF de 4,5 aos 58 DAE.

Medeiros et al. (2000) obtiveram IAF de 3,2 a 3,9 para feijoeiro irrigado, cv. Carioca 80-SH, semeado nas densidades de plantio de 14 e 28 plantas m^{-2} , aos 59 DAE, quando se iniciou a estabilização do acúmulo da matéria seca das folhas verdes.

Guandique (1993), por sua vez, encontrou um valor de IAF de 2,9, para a variedade Carioca, cuja densidade populacional era de 20 plantas m^{-2} . Gomes et al. (2000) obtiveram IAF máximo de aproximadamente 6,5, aos 43 DAE, sendo o maior valor para essa variedade encontrado dentre os trabalhos avaliados.

Stone & Pereira (1994) avaliaram o crescimento do feijoeiro, var. Carioca, irrigado por aspersão e obtiveram os maiores valores de IAF variando de 4,0 a 5,5, por volta de 55 DAE.

Wutke (1998) mediu o IAF do feijoeiro irrigado, var. IAC Carioca, semeado em Latossolo roxo, aos 53 DAE, quando as plantas estavam no seu florescimento pleno e formação de vagens e encontrou valores variando de 1,9 a 2,7 em dois anos de cultivo.

Os valores obtidos no presente trabalho encontram-se na faixa de variação dos maiores observados por outros autores na literatura, o que demonstra o bom desempenho da cultura do feijoeiro em todos os sistemas de preparo avaliados em Campinas – SP, no ano de 1999.

Pelo reduzido número de trabalhos relacionando o efeito do sistema de preparo sobre o índice de área foliar do feijoeiro, selecionou-se Xu e Pierce (1998), que durante dois anos de ensaio com essa cultura, observaram os maiores valores de área foliar no tratamento plantio direto durante o primeiro ano de cultivo e nenhuma diferença significativa no ano seguinte.

Urchei et al. (2000) avaliaram os efeitos do plantio direto e do preparo convencional com arado de disco sobre o desenvolvimento de duas cultivares de feijoeiro, submetidas a dois espaçamentos diferentes e irrigadas via pivô central. Esses autores observaram que o plantio direto se destacou em relação ao convencional para as duas variedades estudadas no que se refere ao índice de área foliar, atingindo os valores máximos de 5,1 e 4,2 em comparação aos resultados apresentados pelo sistema convencional, de 3,2 e 2,0 obtidos pelas variedades Aporé e Safira, respectivamente, aos 58 DAE durante o estágio de florescimento.

O sistema de amostragem ao longo do ciclo não permitiu uma comparação estatística; somente em uma data isso foi possível: na época do florescimento, aos 44 DAE.

Nessa data, não houve significância estatística pelo teste de Wilks entre os tratamentos para o índice de área foliar ($\text{prob}(F > F_c) = 0,8203$), o qual atingiu 2,7; 2,9; 3,0 e 3,1 para os sistemas de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa respectivamente.

Os maiores valores observados de índice de área foliar para todos os tratamentos ocorreram após os 44 DAE, data a partir da qual se observam as maiores diferenças entre os tratamentos.

A evolução desse parâmetro revela uma superioridade do tratamento escarificador em relação aos tratamentos sob o mesmo manejo de água e desempenho destacado do sistema alternado sobre os demais. As relações altamente significativas obtidas neste ensaio foram as seguintes:

a) sistema de preparo de solo *alternado*:

$$\text{IAF} = 0,394 - 1,03 \times 10^{-1} \text{DAE} + 6,41 \times 10^{-3} \text{DAE}^2 - 6,17 \times 10^{-5} \text{DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,99^{**} \quad (26)$$

b) sistema de preparo do solo *escarificador*:

$$\text{IAF} = -0,141 - 1,16 \times 10^{-2} \text{DAE} + 3,69 \times 10^{-3} \text{DAE}^2 - 4,19 \times 10^{-5} \text{DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,92^{**} \quad (27)$$

c) sistema de preparo do solo *arado de disco*:

$$\text{IAF} = -0,0496 - 2,22 \times 10^{-2} \text{DAE} + 3,83 \times 10^{-3} \text{DAE}^2 - 4,31 \times 10^{-5} \text{DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (28)$$

d) sistema de preparo do solo *enxada rotativa*:

$$\text{IAF} = 0,0497 - 4,51 \times 10^{-2} \text{DAE} + 4,74 \times 10^{-3} \text{DAE}^2 - 5,19 \times 10^{-5} \text{DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,96^{**} \quad (29)$$

4.3.4. Fitomassa e número de trifólios

O acúmulo da matéria seca (MS) ao longo do ciclo da cultura, para os tratamentos de sistema de preparo do solo, é apresentado na Figura 28.

A curva de acumulação da matéria seca total teve o formato sigmóide, o qual é típico das curvas de crescimento (Hunt, 1970).

A evolução da matéria seca total das partes das plantas, tanto por área quanto por planta, apresentaram diferenças. Nos sistemas de preparo alternado, escarificador e enxada rotativa, o máximo valor acumulado de matéria seca foi de 541,0; 509,9 e 522,3 g m⁻², respectivamente, alcançados aos 65 DAE, enquanto no tratamento arado de disco, atingiu-se o máximo de 488,1 g m⁻² no dia da colheita, aos 83 DAE.

Gomes et al. (2000) avaliaram o desenvolvimento da cultivar Carioca sob condições irrigadas, e observaram um valor máximo de matéria seca total acumulada na parte aérea do feijoeiro de 491,5 g m⁻², alcançada aos 63 DAE. Medeiros et al. (2001) verificaram um acúmulo máximo de biomassa do feijoeiro, cv. IAC-Carioca, de 601,5 g m⁻² aos 57 DAE.

Portanto, o desempenho da cultura, com relação a esse parâmetro, esteve próximo ao obtido por outros autores em ensaios com a cultura do feijoeiro irrigado.

Apesar de no final do ciclo, parte da matéria seca ser perdida devido à abscisão das folhas, dificultando a coleta, observou-se no campo que o ciclo do feijoeiro no sistema enxada rotativa foi mais precoce em relação aos demais sistemas, motivo pelo qual a colheita ocorreu três dias antes dos demais.

Esse fato demonstra um desempenho ligeiramente pior deste tratamento e reflete-se nos parâmetros referentes às relações que descrevem o acúmulo de matéria seca com o tempo, na fase de crescimento linear do feijoeiro, apresentado na Tabela 14.

A taxa média de crescimento da cultura na fase de crescimento linear, de 31 a 65 DAE, foi maior nos tratamentos conservacionistas alternado e escarificador alcançando 12,5 e 12,6 g m² dia⁻¹, respectivamente, em relação aos tratamentos enxada rotativa e arado de disco que foram de 11,1 e 11,4 g m² dia⁻¹, respectivamente, porém essas diferenças não foram significativas ao nível 95%.

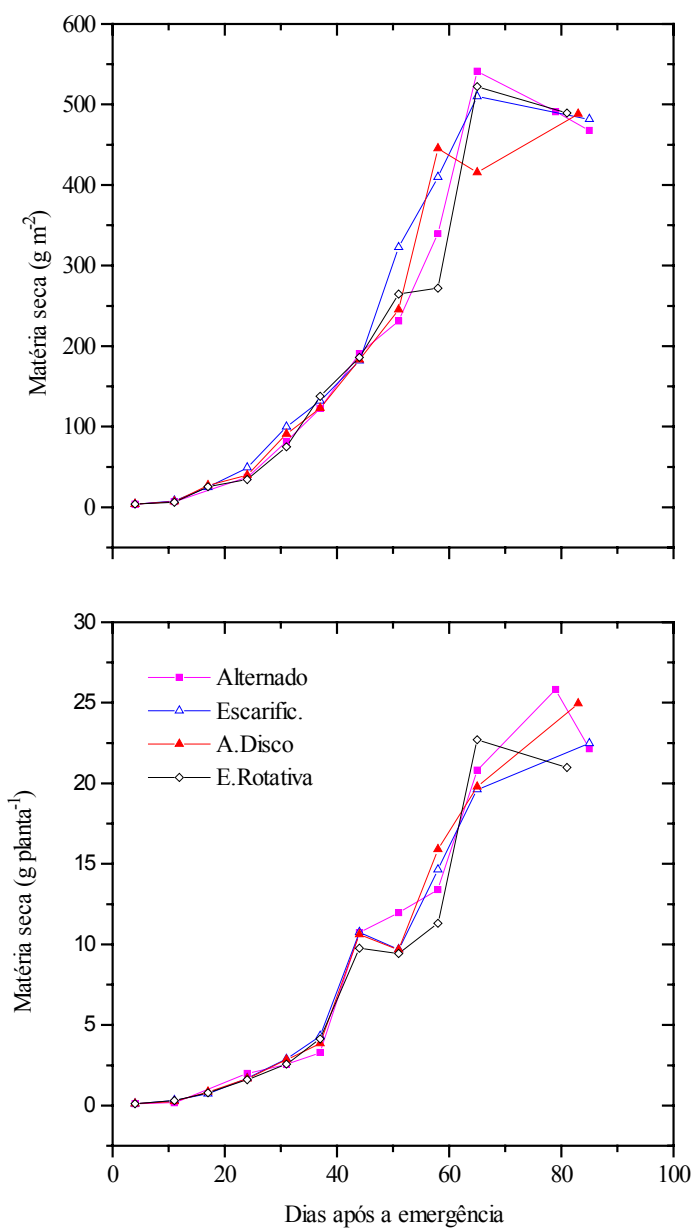


Figura 28. Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Tabela 14. Equações de primeiro grau ($Y = A + BX$) relacionando acúmulo de matéria seca do feijoeiro (g m^{-2}) com o tempo (DAE) para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, durante a fase de crescimento linear de 31 a 65 DAE, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Tratamento	A	B	LI	LS	r^2	n
Alternado	-344,82	12,50	7,09	17,92	0,89**	6
Escarificador	-326,75	12,64	9,65	15,64	0,96**	6
Arado de Disco	-277,37	11,07	6,41	16,01	0,88**	6
Enx. Rotativa	-297,90	11,35	5,25	17,43	0,84**	6

LI: limite inferior do intervalo de confiança do coeficiente angular B ao nível de 95%; LS: limite superior do intervalo de confiança do coeficiente angular B ao nível de 95%; n: número de observações.

Esses valores estão próximos aos obtidos por Medeiros et al. (2001) para a cultura do feijoeiro irrigado, semeado a uma densidade de plantio de 28 plantas m^{-2} , e que atingiu 12,7 $\text{g m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

O sistema de amostragem de plantas permitiu uma avaliação estatística da matéria seca total somente em dois momentos: no florescimento e no final do ciclo.

No florescimento, não há significância estatística pelo teste de Wilks entre os sistemas de preparo do solo tanto para a matéria seca total ($\text{prob}(F > F_c) = 0,9945$) quanto para a matéria seca total por planta ($\text{prob}(F > F_c) = 0,8721$).

Os resultados das médias de matéria seca para os diferentes sistemas do preparo do solo foram de 178,6; 182,8; 183,4 e 186,0 g m^{-2} , respectivamente, para os tratamentos alternado, escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa.

Urchei et al. (2000) encontraram diferenças no acúmulo de matéria seca total do feijoeiro, as quais se iniciaram aos 37 DAE e intensificaram-se do florescimento até a maturação das vagens, com destaque do plantio direto sobre o convencional.

A segunda comparação de matéria seca é apresentada no próximo item relacionado à avaliação da produção.

As relações altamente significativas obtidas para a variação da matéria seca (g m^{-2}) ao longo do ciclo são as seguintes:

a) sistema de preparo de solo *enxada rotativa*:

$$MS = 50,0 - 8,72 \text{ DAE} + 0,394 \text{ DAE}^2 - 2,67 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,94^{**} \quad (30)$$

b) sistema de preparo do solo *arado de disco*:

$$MS = 54,29 - 9,62 \text{ DAE} + 0,438 \text{ DAE}^2 - 3,11 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,97^{**} \quad (31)$$

c) sistema de preparo do solo *escarificador*:

$$MS = 70,47 - 12,39 \text{ DAE} + 0,544 \text{ DAE}^2 - 3,99 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,98^{**} \quad (32)$$

d) sistema de preparo do solo *alternado*:

$$MS = 71,34 - 13,27 \text{ DAE} + 0,544 \text{ DAE}^2 - 3,89 \times 10^{-3} \text{ DAE}^3 \quad n = 11 \quad r^2 = 0,96^{**} \quad (33)$$

Apesar de as tendências dos coeficientes das equações 30 a 33 indicarem uma diferenciação entre os tratamentos ditos conservacionistas, ou seja, o alternado e o escarificador e aqueles nomeados convencionais (arado de disco e enxada rotativa), com maiores valores de coeficiente linear para os primeiros, na comparação de intervalos de confiança da média para um nível de 95%, não foram encontradas diferenças significativas entre os referidos coeficientes em todas as equações mencionadas.

A Figura 29 apresenta a evolução do número de trifólios ao longo do ciclo. O momento em que se atingiu o número máximo de trifólios por planta diferiu entre os tratamentos com o mesmo manejo de água e o sistema alternado.

Pelo teste de Wilks, não houve significância estatística para a variável número de trifólios planta⁻¹, durante o florescimento ($\text{prob}(F > F_c) = 0,7592$), aos 44 DAE.

No sistema escarificador, arado de disco e enxada rotativa os valores máximos foram 21,1; 23,3 e 20,3 trifólios planta⁻¹, respectivamente, alcançados aos 44 DAE, na época do florescimento, enquanto para o sistema alternado o maior valor observado foi de 23,0 trifólios planta⁻¹, atingido aos 51 DAE.

—◇— E.Rotativa —■— Arado de Disco —□— Escarificador —◆— Alternado

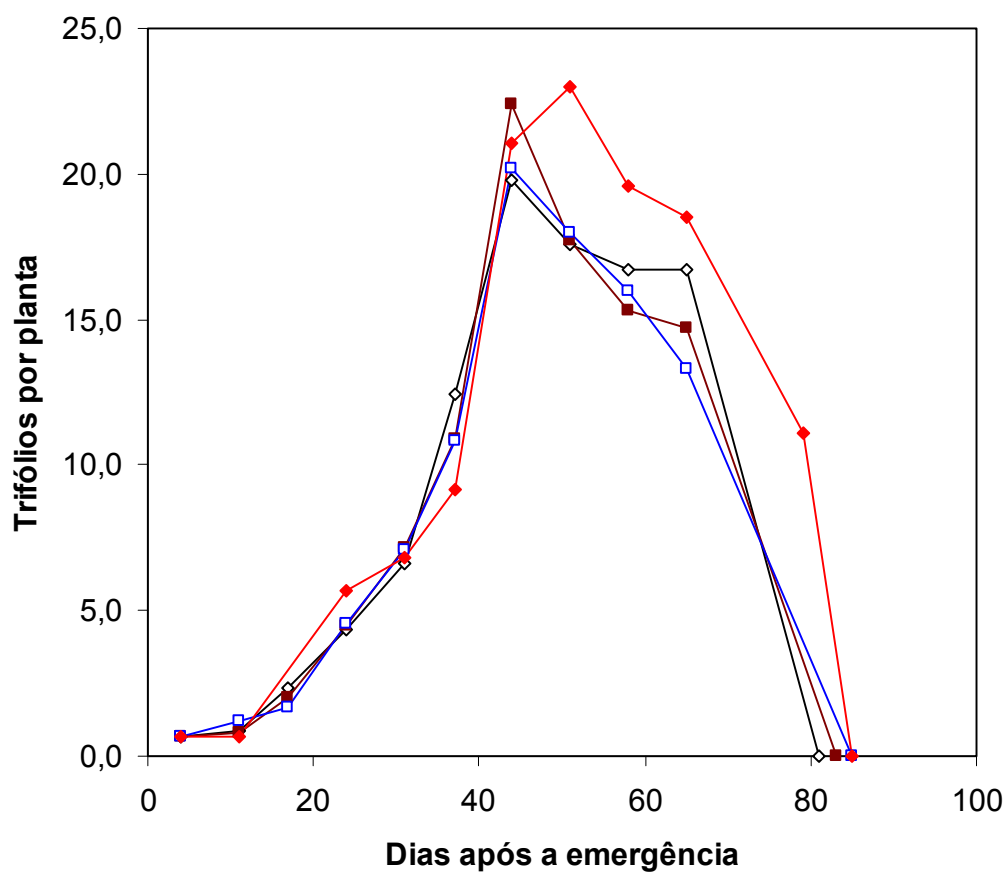


Figura 29. Evolução do número de trifólios da cultura do feijoeiro para os diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas – SP, no ano de 1999.

O número de folhas por planta foi estatisticamente diferente em três das quatro épocas de amostragem realizadas por Zaffaroni et al. (1991) para a cultura do feijoeiro, submetida aos sistemas de preparo do solo manual com enxada, tração animal, plantio direto e aração e gradagem. Todavia, não se verificou nenhuma diferença significativa entre os sistemas motomecanizados convencional e plantio direto em todas as datas avaliadas.

Xu & Pierce (1998) verificaram diferenças significativas no número de trifólios por planta do feijoeiro, na avaliação entre os sistemas de preparo do solo arado aiveca, escarificador e plantio direto, com e sem subsolagem antes do plantio. Valores máximos significativamente maiores foram observados somente no primeiro ano, destacando-se o sistema plantio direto submetido à subsolagem antes da semeadura.

Não foi observado, dentre os parâmetros avaliados nesta seção, um tratamento que significativamente se destacasse, assim como na literatura não se têm encontrado sistemas de preparo do solo que provoquem um desempenho consistentemente superior do feijoeiro.

4.4. Produção

Analisando-se as componentes da produção pela MANOVA, rejeita-se, pelo teste de Wilks (Tabela 33A), a hipótese de nulidade de efeitos de sistemas de preparo do solo semelhantes. Logo, há pelo menos em uma dessas variáveis efeitos entre sistemas de preparo do solo. Os resultados da avaliação das componentes de produção encontram-se na Tabela 15.

As componentes de produção foram determinadas com base em amostras coletadas em subparcelas de 1,5 m², retiradas uma de cada parcela de 9 m² colhida. Por esse motivo, não se verificou uma diferença significativa da matéria seca de grãos por m² na Tabela 15, enquanto na produção final isto foi observado. Como parcelas com área de 9 m² têm sido usadas por outros autores para análise de produção final do feijoeiro (Medeiros et al. 2001, Stone & Silveira, 1999, Wutke et al., 1998) consideramos o resultado levantado neste tamanho de parcela para a discussão do rendimento da cultura.

As duas componentes de produção que apresentaram diferenças significativas foram o número de vagens por planta e o índice de colheita.

Tabela 15. Matéria seca total da produção e de seus componentes, para os diferentes tratamentos de sistema de preparo do solo, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Tratamento	Vagens por planta	Grãos por vagem	Peso 1000 sementes	Matéria seca grãos	Matéria seca grãos	Matéria seca total	Matéria seca total	Índice de colheita	n
	(n ^o)	(n ^o)	(g)	(g planta ⁻¹)	(g m ⁻²)	(g planta ⁻¹)	(g m ⁻²)	(%)	
Alternado	12,2ab	4,3a	249,0a	13,2a	274,4a	22,7a	479,9a	57,9a	6
Escarificador	11,7ab	4,5a	241,7a	12,7a	267,6a	22,8a	481,5a	55,7ab	6
A. Disco	12,6a	4,3a	247,8a	13,2a	257,3a	25,1a	487,0a	53,0bc	6
E. Rotativa	10,5b	4,1a	248,5a	10,8a	251,7a	21,0a	489,5a	51,3c	6
	dms=1,8 v pl ⁻¹	dms=0,4 gr v ⁻¹	dms=10,6 g	dms=2,6 g pl ⁻¹	dms=43,2 g m ⁻²	dms=4,5 g pl ⁻¹	dms=74,1 g m ⁻²	dms=4,1%	
	CV = 12,46%	CV = 8,17%	CV = 3,56%	CV = 17,37%	CV = 13,64%	CV = 16,18%	CV = 12,75%	CV = 6,26%	

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas (dms) a 5%, CV: coeficiente de variação, n: número de observações.

O número de vagens por planta do sistema enxada rotativa, embora significativamente menor, apresentou um valor semelhante a outros registrados para o feijoeiro sob condições irrigadas, como visto em Gomes et al. (2000), com o cultivar Carioca, alcançando 10,6 vagens por planta; e Medeiros et al. (2000), com a variedade IAC Carioca, que obteve 10,1 vagens por planta.

A componente de produção mais citada na literatura como sendo influenciada pelo sistema de preparo do solo é o número de vagens por planta (Alemán, 2001, Stone & Moreira, 2000, Santos et al., 1997, Chagas et al., 1994 e Zaffaroni, 1991).

Stone & Moreira (2000) observaram que os sistemas de preparo do solo afetaram significativamente o número de vagens por planta e o de grãos por vagem, para a cultura do feijoeiro cv Aporé e Safira. O número de vagens por planta foi significativamente maior no plantio direto mais cobertura morta do que o observado nos tratamentos grade aradora, arado escarificador, arado aiveca e plantio direto, os quais não diferiram entre si. O plantio direto mais cobertura morta também apresentou os maiores valores de número de grãos por vagem, diferindo significativamente do tratamento grade aradora. O sistema grade aradora mostrou número de vagens por planta significativamente maior do que o sistema arado aiveca para a cultivar Carioca do feijoeiro, porém ambos os sistemas não diferiram do sistema sem preparo, como atestam Santos et al. (1997). Outra componente que apresentou diferença significativa foi a produção de grãos por planta, sendo maior no sistema grade aradora.

Chagas et al. (1994) compararam o desempenho do feijoeiro, cv Ouro, sob dois sistemas de preparo: plantio convencional e convencional com enxada rotativa, ambos cobertos com palhada de milho e soja, e submetidos a quatro lâminas de irrigação. Esses autores observaram, no segundo ano de cultivo, um efeito significativo dos sistemas de manejo sobre o número médio de grãos por vagem ($P < 0,01$), a componente da produção mais relacionada ao rendimento de grãos do feijoeiro. O plantio direto em terreno coberto com palha de soja apresentou os valores significativamente inferiores de número de vagens por planta, contudo, essa diferença não foi detectada na produção de grãos.

Zaffaroni et al. (1991) encontraram diferenças significativas devido ao efeito do preparo do solo sobre número de vagens por planta. Tais diferenças, porém, não foram

significativas na comparação dos sistemas motomecanizados convencional com arado de disco e plantio direto.

Alemán (2001) observou valores significativamente superiores no número de vagens por planta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) para o sistema de preparo cultivo mínimo em relação aos tratamentos plantio direto e convencional, em experimento desenvolvido durante três anos, nas mesmas parcelas experimentais, na Nicarágua.

Em avaliação realizada por Xu & Pierce (1998) do desempenho da cultura do feijoeiro sob diferentes sistemas de preparo do solo, o plantio direto apresentou resultados estatisticamente menores de biomassa da planta em relação aos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si, somente no primeiro ano de cultivo; no ano seguinte, não se encontrou diferença alguma entre os tratamentos.

Apesar de não terem sido verificadas diferenças significativas nas componentes de produção matéria seca de grãos e matéria seca total da parte aérea, o sistema enxada rotativa atingiu o menor valor para o primeiro parâmetro e o mais elevado para o segundo. Essa combinação levou ao resultado estatisticamente inferior de índice de colheita apresentado por esse sistema em relação aos demais avaliados. Todavia, o valor atingido de 51,3% pode ser considerado alto para o feijoeiro, comparável aos observados em outros cultivos irrigados, como em Medeiros et al. (2000) que obtiveram um índice de colheita de 41,4 %, e em Calvache et al. (1997), cv INIAP 404, cujo índice de colheita variou de 49 a 57%.

A avaliação da produção final não apresentou diferenças significativas a um nível de 95%, entre os tratamentos alternado e escarificador, os quais atingiram 3.062 e 2.846 kg ha⁻¹ respectivamente, com a umidade de grãos de 13%. Todavia, esses valores foram significativamente superiores aos obtidos pelos sistemas de preparo do solo arado de disco e enxada rotativa, que alcançaram as respectivas marcas de 2.501 e 2.446 kg ha⁻¹, não havendo diferença estatística entre si.

O efeito das alterações nas características físico-hídricas do solo na produtividade do feijoeiro e na distribuição do sistema radicular, provocadas por diferentes preparos do solo, ainda não está bem determinado (Stone & Silveira, 1999).

No presente ensaio, houve diferenças significativas no rendimento de grãos do feijoeiro, cv IAC Carioca, entre o tratamento alternado, utilizando arado aiveca, e os de

enxada rotativa e arado de disco, demonstrando o efeito do manejo de água diferenciado. Contudo, essa diferença não foi estatisticamente superior ao tratamento escarificador, o qual teve um manejo de irrigação semelhante aos demais citados e obteve, da mesma forma, uma produção significativamente mais elevada.

Os valores de produção alcançados pelos quatro tratamentos estão na faixa de 2.500 a 3.000 kg ha⁻¹, e são comparáveis às maiores produções registradas para cultivos irrigados do feijoeiro como Silveira et al. (2001) (cv Aporé), Medeiros et al. (2000) (cv IAC Carioca), Gomes et al. (2000) (cv Carioca), Kluthcouski et al. (2000) (cv Jalo Precoce), Wutke et al. (1998) (cv IAC Carioca), Silveira et al. (1994) (cv Carioca e Aporé), dentre outros, demonstrando manejo adequado de irrigação e tratos culturais.

4.5. Balanço hídrico de campo

4.5.1. Umidade do solo

A umidade do solo ao longo do perfil foi monitorada por meio do método gravimétrico realizando-se medidas em 38 datas ao longo do ciclo, o que corresponde a 52% do número de dias do período selecionado para o balanço hídrico, que variou de 6 a 78 DAE. Os resultados médios de umidade observados para todo o ciclo são apresentados na Tabela 34A dos anexos, enquanto as medidas de umidade nos três tratamentos encontram-se nas Figuras 30 e 31, sendo cada medida uma média de três pontos por tratamento.

Na Tabela 34A e nas Figuras 30 a 31, pode-se observar que os menores valores médios de umidade ocorreram em diferentes camadas nos tratamentos avaliados.

O sistema de preparo enxada rotativa apresentou o menor valor médio de umidade do solo na camada de 0 a 0,10 m. Contudo, foi nesse tratamento que se verificou maior capacidade de armazenamento de água no solo (Tabela 4). Esse fato sugere que a retirada de água foi relativamente maior nessa camada em comparação aos outros tratamentos, o que é corroborado pela distribuição do sistema radicular nesta parcela cuja concentração foi de 60,5%, relativamente superior à dos demais tratamentos nos primeiros 0,20 m de profundidade do perfil do solo.

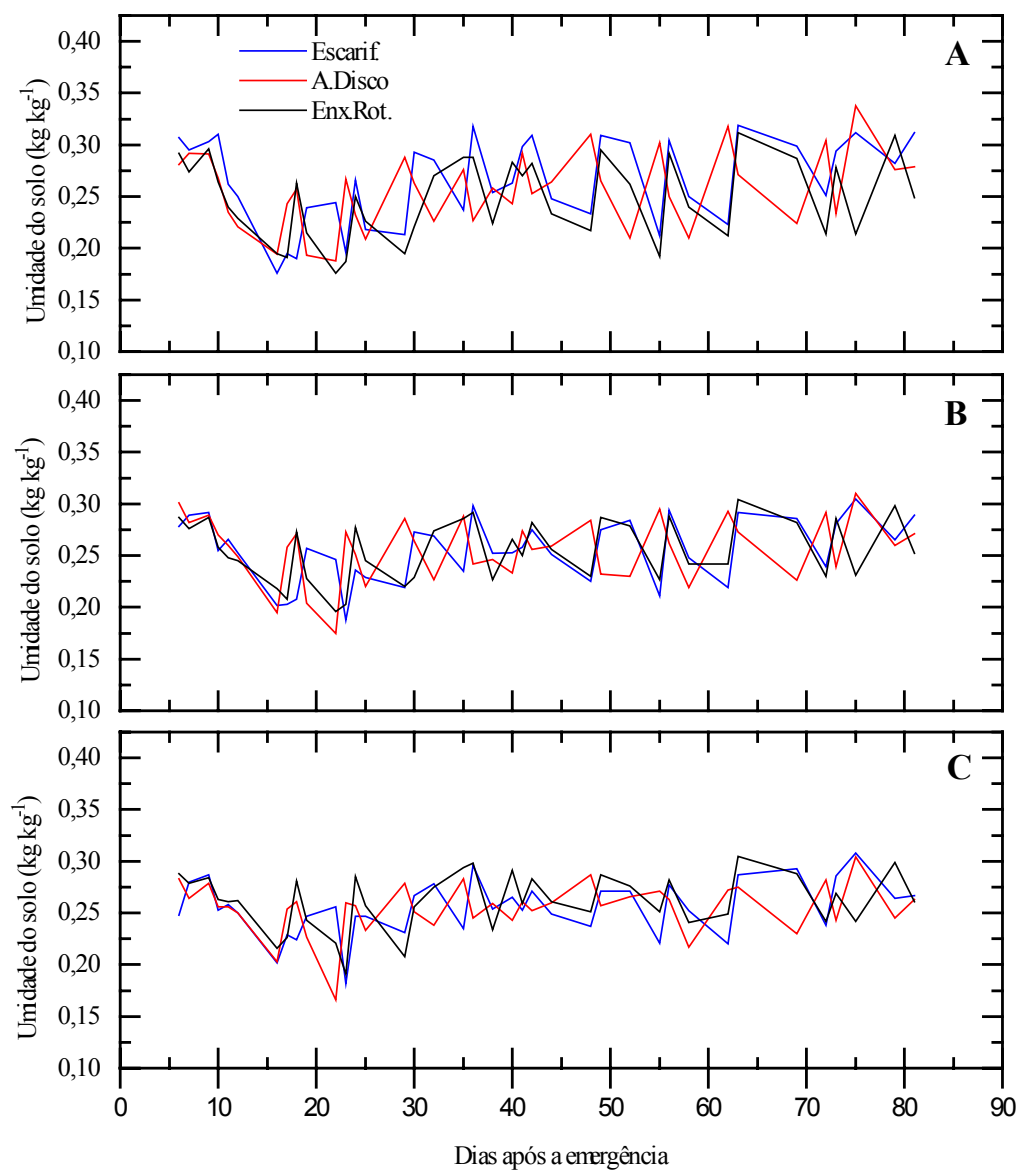


Figura 30. Evolução da umidade no solo ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado para os sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa nas camadas de 0 a 0,10 m (A), 0,10 a 0,20 m (B) e 0,20 a 0,30 m (C), em Campinas - SP, no ano de 1999.

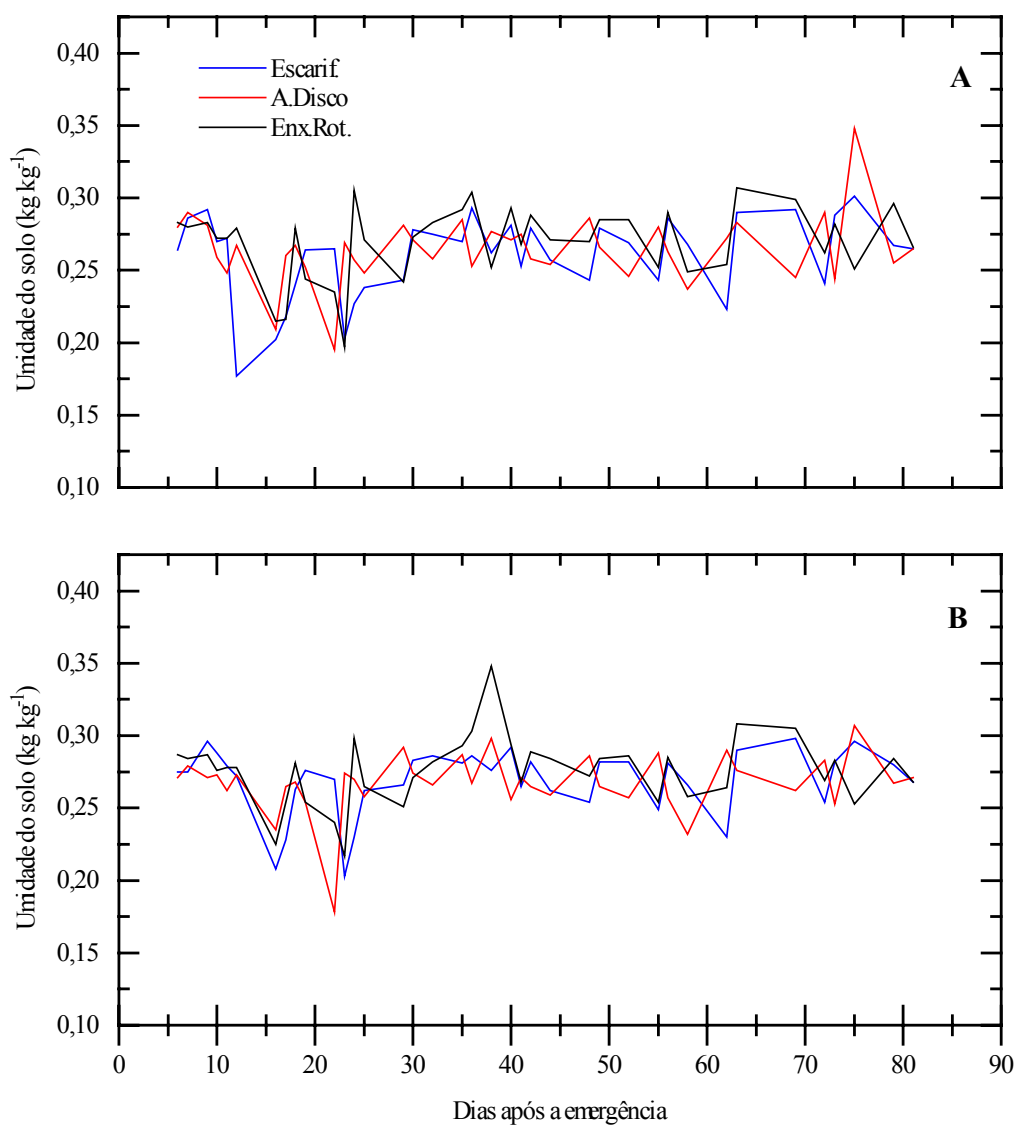


Figura 31. Evolução da umidade no solo ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado para os sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa nas camadas de 0,30 a 0,40 m (A) e 0,40 a 0,50 m (B), em Campinas - SP, no ano de 1999.

Na camada de 0,10 a 0,20 m, a umidade média foi comparável à dos demais tratamentos e, nas profundidades restantes, foi maior, acentuando o caráter da exploração de água na camada mais superficial pela cultura desenvolvida na parcela enxada rotativa.

No tratamento arado de disco, a umidade média foi praticamente a mesma nas camadas de 0,10 a 0,30 m, mantendo-se intermediária entre os tratamentos escarificador e enxada rotativa na camada de 0 a 0,10 m e comparável à dos demais tratamentos na camada de 0,10 a 0,20 m. O menor valor de umidade média foi observada na camada de 0,20 a 0,30 m, onde se concentrou a maior quantidade relativa de matéria seca de raízes para esse tratamento (Tabela 11).

A cultura do feijoeiro semeada na parcela correspondente ao sistema de preparo escarificador apresentou um comportamento distinto dos demais. Comparando-se as camadas do solo, observa-se que esse tratamento foi o que apresentou a maior umidade do solo média na camada superficial (0 a 0,10 m) e os menores teores nas camadas 0,10 a 0,40 m, além dos maiores coeficientes de variação, indicando maior retirada de água pelas raízes em profundidade em relação aos demais sistemas de preparo do solo.

Essa exploração diferenciada de água pelas raízes no perfil do solo pelo feijoeiro nos tratamentos escarificador e arado de disco em relação à enxada rotativa, pode ter levado a períodos mais frequentes de estresse hídrico moderado para o último, o que é corroborado pelos índices de estresse hídrico acumulados no final do ciclo e apresentados nas Figuras 9 e 10.

4.5.2. Balanço hídrico

O balanço hídrico de campo foi realizado nos tratamentos de sistema de preparo do solo escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa, em que foram escolhidos períodos nos quais a perda de água por drenagem profunda não fosse significativa, se comparada às outras componentes desse balanço. Em alguns períodos, como 4 a 9 DAE e 62 a 68 DAE, ocorreram chuvas que impossibilitaram uma estimativa acurada dos fluxos de água subterrânea. Neles, considerou-se a evapotranspiração como sendo igual à evapotranspiração de referência.

O início do balanço foi a partir de 6 DAE (13 de setembro) e se prolongou até 78 DAE (24 de novembro).

Os baixos valores de precipitação ocorridos durante a maior parte do ensaio fizeram com que a principal contribuição de água para a planta fosse pela irrigação.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam a variação do coeficiente de cultura do feijoeiro observado durante todo o ciclo da cultura e determinado com base nos resultados do balanço hídrico de campo. Além disso, simulou-se o coeficiente de cultura basal pela seguinte equação, desenvolvida por Medeiros et al. (2001):

$$k_{cb} = 0,367 - 1,44 \times 10^{-2}(IAF) + 0,206(IAF)^2 - 4,29 \times 10^{-2}(IAF)^3 \quad (34)$$

onde, k_{cb} é o coeficiente de cultura basal (Wright, 1982); IAF é o índice de área foliar do feijoeiro.

O índice de área foliar foi estimado diariamente, utilizando-se das equações 27, 28 e 29 desenvolvidas para os sistemas escarificador, arado de disco e enxada rotativa respectivamente, com base nos dados observados durante o ensaio. Nos dias em que ocorreram chuvas ou irrigações, o coeficiente de cultura foi adotado como sendo 1,1 e pelos valores simulados, calculou-se a evapotranspiração da cultura, para cada tratamento, pela equação 1 durante todo o ciclo do feijoeiro.

Os consumos totais de água observados nos tratamentos foram semelhantes, sendo de 336, 350 e 335 mm, respectivamente, para escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa.

Os totais simulados da evapotranspiração do feijoeiro durante todo o ciclo da cultura atingiram 317, 310 e 305 mm para os tratamentos escarificador, arado de disco e enxada rotativa respectivamente.

O maior consumo de água simulado para o tratamento escarificador, seguido do arado de disco e enxada rotativa, ocorreu porque o coeficiente de cultura é diretamente proporcional ao índice de área foliar pela equação 34, e naquele sistema, o desenvolvimento da cultura foi ligeiramente superior ao dos demais tratamentos.

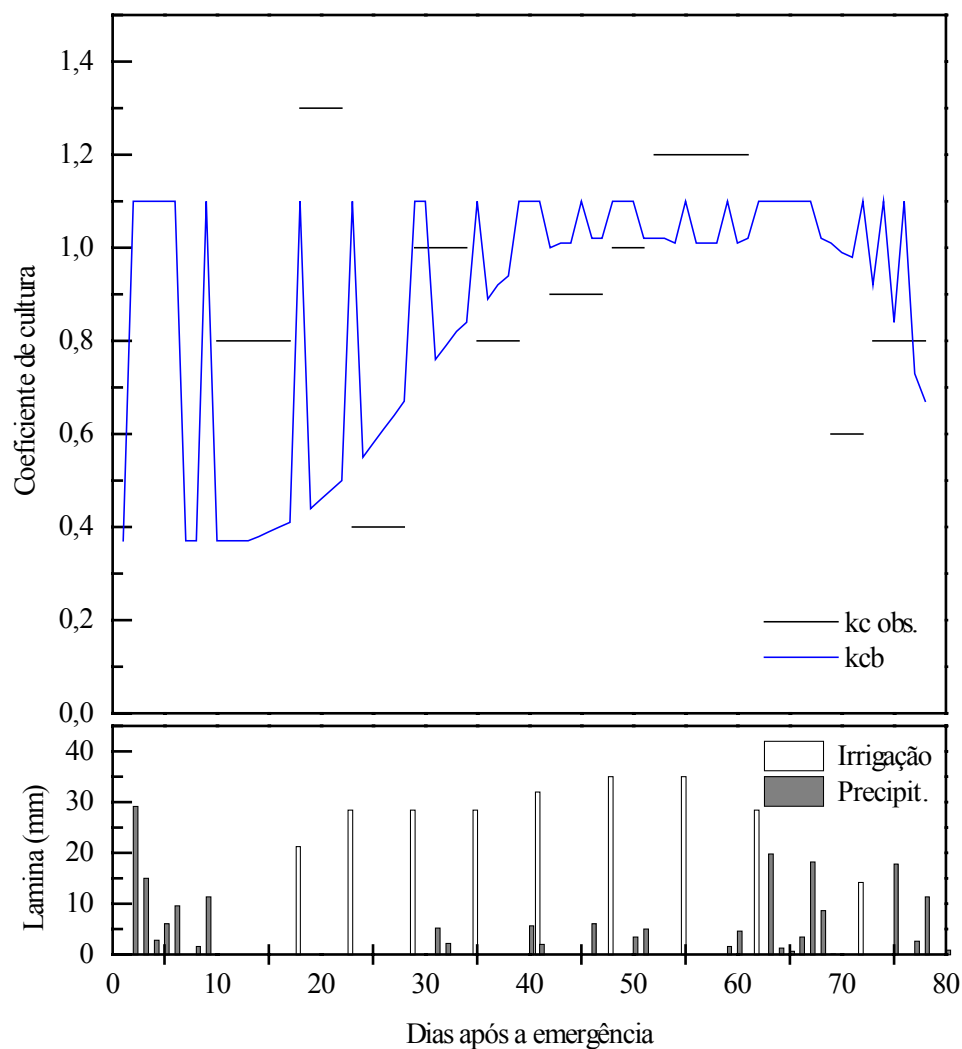


Figura 32. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo com escarificador, em Campinas-SP, no ano de 1999.

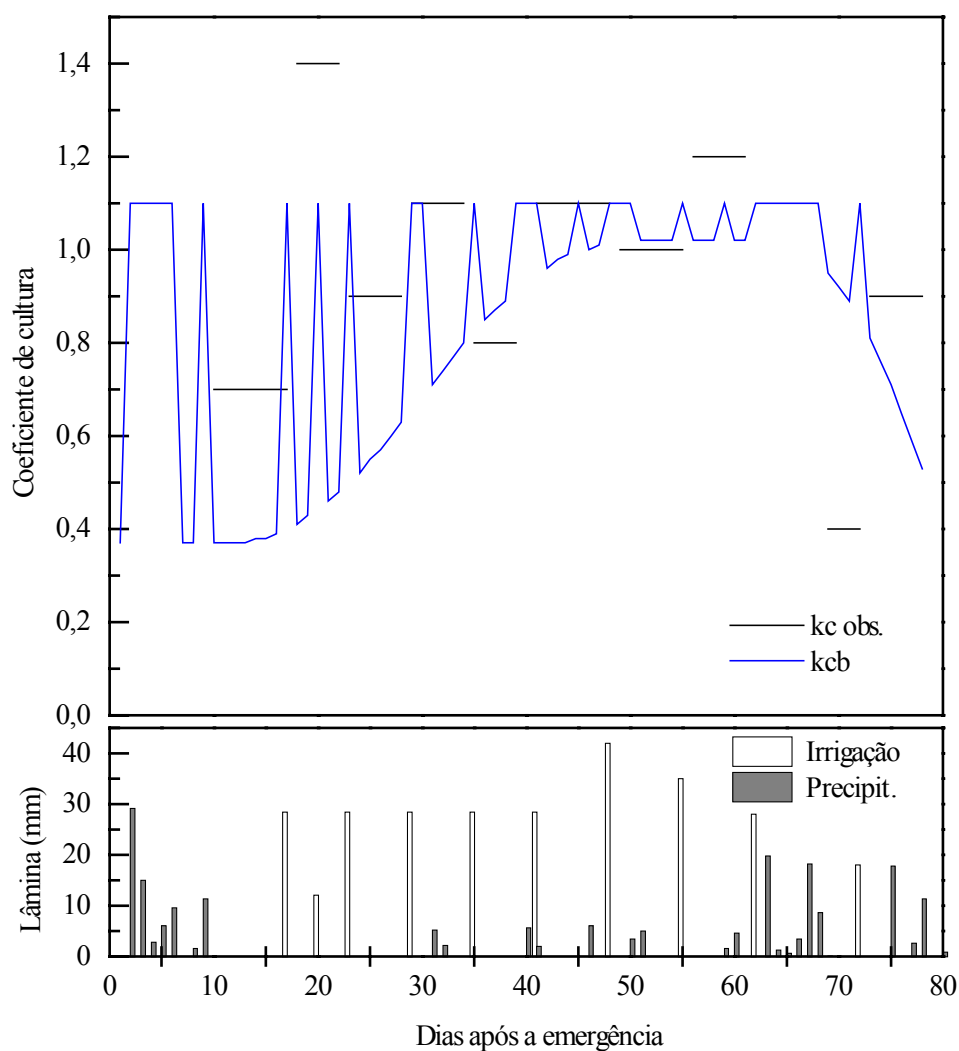


Figura 33. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo arado de disco, em Campinas-SP, no ano de 1999.

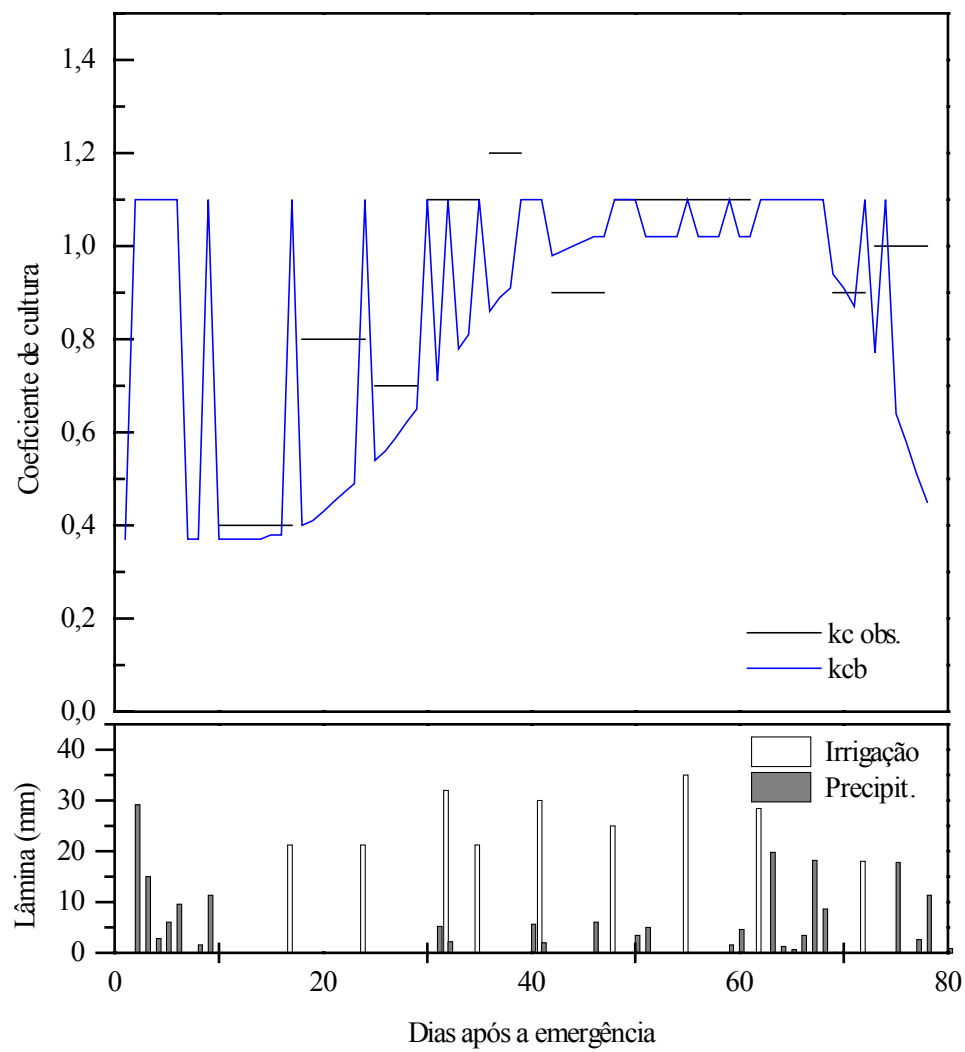


Figura 34. Coeficiente de cultura observado e simulado ao longo do ciclo do feijoeiro irrigado e semeado na parcela submetida ao sistema de preparo do solo enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Os resultados demonstram que o consumo total de água acumulado durante todo o ciclo do feijoeiro pôde ser estimado com base em dados de desenvolvimento da cultura com uma variação de 6 a 11% entre o valor simulado e o observado, podendo ser considerados excelentes sob condições de campo na agricultura irrigada.

A semelhança no crescimento entre os três cultivos foi o principal fator que levou a uma proximidade no consumo de água acumulado durante todo o ciclo do feijoeiro irrigado, possibilitando o uso de uma curva de coeficiente de cultura única, desde que baseada no desenvolvimento da planta.

A Tabela 16 apresenta os resultados da conversão do consumo de água da cultura em matéria seca e produção de grãos para os tratamentos de sistema de preparo do solo escarificador, convencional com arado de disco e enxada rotativa.

Tabela 16. Eficiência do uso da água da biomassa e da matéria seca de grãos do feijoeiro irrigado submetido aos sistemas de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas -SP, no ano de 1999.

Tratamento	Evapotranspiração	Produção		Eficiência do uso da água	
		Grãos	Biomassa	Grãos	Biomassa
	-----mm-----	-----kg ha ⁻¹ -----		-----kg m ⁻³ -----	
Escarificador	336	2519a	4816a	0,753a	1,44a
Arado de disco	350	2213b	4870a	0,632b	1,39a
Enx. Rotativa	335	2164b	4895a	0,645b	1,46a

Apesar de o consumo de água ter sido semelhante, a diferença significativa na produção entre os tratamentos sob o mesmo manejo de irrigação levou a uma eficiência do uso da água significativamente maior do sistema de preparo do solo escarificador em relação ao convencional com arado de disco e enxada rotativa. Os valores de eficiência do uso da água estão acima do recomendado por Doorenbos & Kassan (1979), que apresentam valores para o feijoeiro na ordem de 0,30 a 0,60 kg m⁻³ para grãos com teor de 10% de umidade.

Barros & Hanks (1993) encontraram valores máximos de 0,65 kg m⁻³ e 0,75 kg m⁻³ para a eficiência do uso da água com base na matéria seca de grãos, enquanto para a eficiência

do uso da água, baseada na biomassa, observou-se 1,17 e 1,41 kg m⁻³ para os tratamentos com solo nu e cobertura morta respectivamente.

Calvache et al. (1997) obtiveram uma eficiência do uso da água do feijoeiro, cv. INIAP 4040, que variou de 0,46 a 0,92 kg m⁻³ em tratamento com lâminas diferentes de irrigação e dosagens de nitrogênio.

A densidade de plantio não influenciou a eficiência do uso da água calculada a partir de resultados publicados de consumo de água do feijoeiro por Medeiros et al. (2001) e matéria seca da parte aérea e produção, por Medeiros et al. (2000), para a cultura do feijoeiro.

Os valores alcançados de eficiência do uso da água da parte reprodutiva foram de 0,627 e 0,636 kg m⁻³ para os tratamentos 14 e 28 plantas m⁻², e 1,38 e 1,49 kg m⁻³ de eficiência do uso da água baseado na produção de biomassa para esses mesmos tratamentos de densidade de semeadura. A produção por planta foi o dobro no tratamento de menor densidade de semeadura em relação ao de 28 plantas m⁻², compensando a diferença de população e elevando a eficiência do uso da água.

Portanto, os valores de eficiência do uso da água apresentados no presente estudo estão dentro da faixa encontrada em outros experimentos de feijoeiro irrigado.

Neste ensaio, os valores próximos de consumo de água entre os diferentes tratamentos e a magnitude dos valores de produção e de componentes de produção alcançados corroboram a conclusão de que o manejo de irrigação foi adequado e não influenciou os resultados entre tratamentos, evidenciando que as variações encontradas devem estar relacionadas a efeitos provocados pelos sistemas de preparo do solo.

4.6. Considerações finais

Analisando-se o conjunto de resultados, conclui-se que o melhor desempenho do tratamento de sistema de preparo do solo escarificador é mais provavelmente explicado por uma confluência de condições do que por algum fator isolado.

Dentre os fatores determinados durante o ensaio, tem-se aqueles que apresentaram diferenças significativas e os que não as apresentaram, mas cujo comportamento contribui para os resultados finais.

Com base nos resultados alcançados nos levantamentos realizados antes do ciclo da cultura, observa-se que a textura, a densidade de partículas e a condutividade hidráulica saturada, determinadas na camada superficial do solo (0 a 0,20 m), não foram, nas condições do presente estudo, indicadores que possibilitassem a inferência sobre um provável melhor desempenho de qualquer um dos tratamentos, em relação à produtividade e eficiência do uso da água.

A densidade e a porosidade total, determinadas nos primeiros 0,20 m, assim como a lâmina total de água no solo até 0,60 m de profundidade, foram indicadores que deram uma melhor qualificação ao tratamento enxada rotativa em relação aos demais e contradisseram o desempenho superior do sistema escarificador.

A resistência do solo à penetração foi muito afetada pela condição e distribuição de umidade do solo, não devendo ser considerada em sua magnitude e sim como um indicador da profundidade compactada, isso se torna mais relevante devido ao fato de a cultura ter-se desenvolvido sob condições irrigadas, com a manutenção de níveis de umidade que reduziram a resistência do solo à penetração.

Os parâmetros que melhor descreveram os atributos do solo para o desenvolvimento e eficiência do uso da água pela cultura do feijoeiro foram aqueles relacionados à distribuição em profundidade da porosidade ao longo do perfil do solo, determinados com base na curva de retenção de água no solo, e a capacidade de infiltração de água no solo, a qual é um atributo dependente, dentre outros fatores, da continuidade e do tamanho dos poros (Hillel, 1998, Beutler et al., 2001).

O reflexo dos efeitos acumulados do sistema de preparo sobre a qualidade do solo pôde então ser avaliado pelo desempenho da cultura do feijoeiro e eficiência do uso da água.

O parâmetro de crescimento da cultura que demonstrou diferença significativa foi a altura de planta. A porcentagem de cobertura vegetal, o índice de área foliar, a matéria seca total e de raízes, apesar de não terem apresentado uma significância estatística, foram maiores no tratamento escarificador em relação ao arado de disco e à enxada rotativa.

O desenvolvimento radicular mais uniforme em profundidade no sistema escarificador parece estar associado aos seguintes fatores, já citados por outros autores: melhor distribuição de poros ao longo do perfil, sendo este um aspecto apontado como benéfico para o

desenvolvimento radicular de diversas culturas (Castro, 1995); maior profundidade do início da camada compactada desse tratamento em relação à enxada rotativa e arado de disco, condição essa verificada como benéfica para a distribuição do sistema radicular do feijoeiro por Stone & Silveira (1999); o menor gradiente de variação da resistência do solo à penetração em profundidade, outro fator citado como responsável para o melhor crescimento de leguminosas como a soja (De Maria et al., 1999).

O crescimento diferenciado do sistema radicular deve ter promovido melhor aproveitamento da água pela cultura do feijoeiro no tratamento escarificador em relação aos demais, submetidos ao mesmo manejo de água. Esse fato é corroborado por dois resultados: o primeiro refere-se à camada do solo explorada pela cultura para retirada de água, a qual foi mais profunda no tratamento escarificador, cuja variação ficou entre 0,10 a 0,40 m, enquanto no tratamento enxada rotativa concentrou-se na camada superficial do solo, até a profundidade de 0,20 m; o segundo diz respeito ao índice de estresse hídrico da cultura e sua relação com a produção do feijoeiro, como observado na Figura 35.

Na Figura 35, observa-se a relação linear, altamente significativa, entre a produção e o índice de estresse hídrico acumulado (IEHD) para a cultura do feijoeiro submetido aos diferentes sistemas de preparo do solo, cuja forma é a seguinte:

$$Y = -14,905 \times \text{IEHD} + 3296,1 \quad r^2 = 0,91^{**} \quad (35)$$

onde Y é a produção (kg ha^{-1}) e IEHD o índice de estresse hídrico da cultura, baseado na diferença entre a temperatura do dossel e a do ar.

A Figura 35 permite observar que o tratamento alternado foi aquele que apresentou a maior produção e o menor índice de estresse hídrico acumulado. Dentre os tratamentos que tiveram o mesmo manejo de água, o sistema de preparo escarificador totalizou o menor índice de estresse hídrico acumulado, seguido do sistema convencional com arado de disco e enxada rotativa.

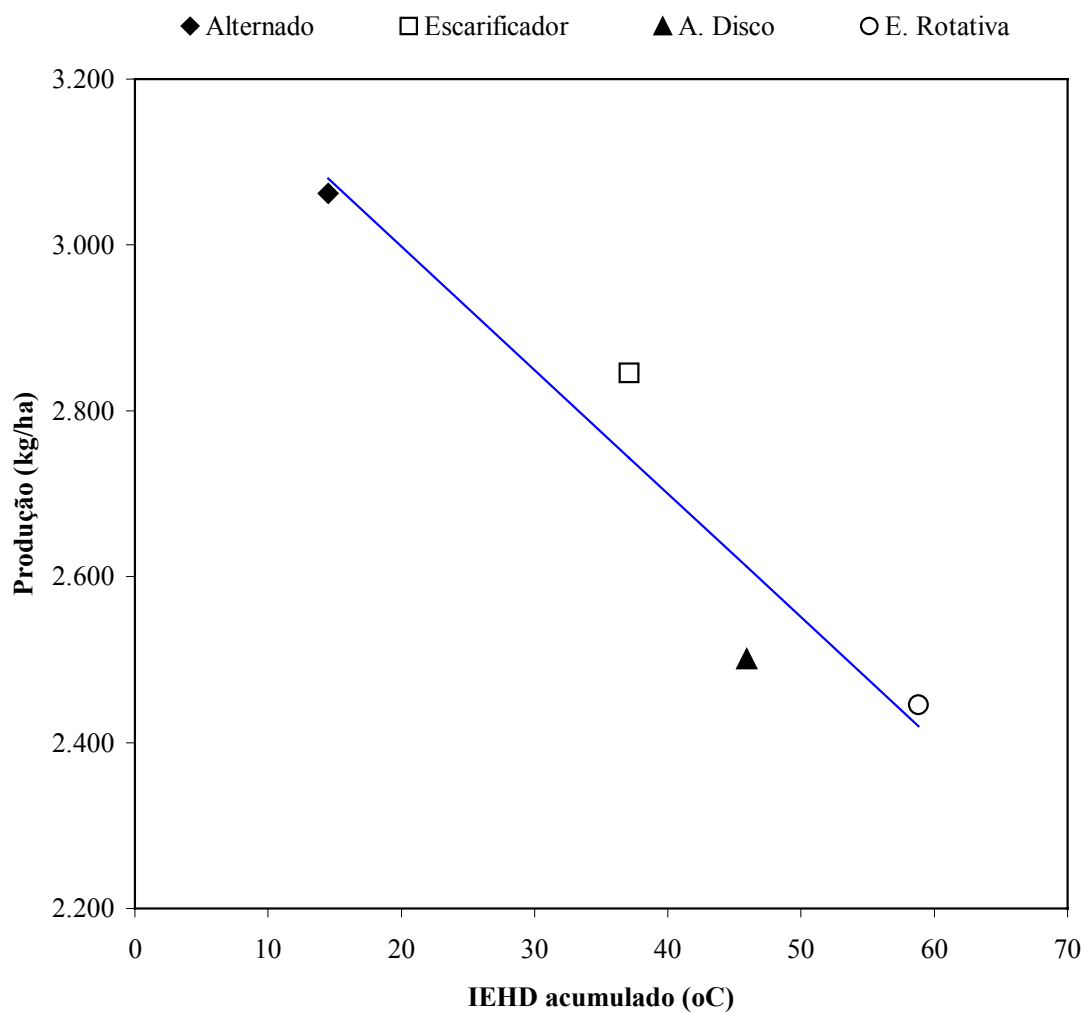


Figura 35. Variação da produção final com o índice de estresse hídrico acumulado (IEHD) para os tratamentos de sistema de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

O maior IEHD apresentado pelo tratamento enxada rotativa é um indicativo de deficiência hídrica no feijoeiro, a qual pode ter levado ao menor número de vagens por planta neste sistema de preparo do solo, fruto do decréscimo na porcentagem de vingamento de flores como comentado por Stone & Moreira (2000), apesar das condições muito próximas do manejo de água entre os tratamentos.

Portanto, o desempenho da cultura e a sua conseqüente maior eficiência do uso da água devem ser resultado de efeitos acumulados, ao longo dos anos, do sistema de preparo do solo.

Outro importante aspecto a ser considerado e que influencia a produção e eficiência de o uso da água é o fato do sistema de preparo enxada rotativa perder a maior quantidade de solo e nutrientes na época das chuvas em relação aos demais tratamentos estudados, de acordo com os levantamentos realizados por um período de oito anos e compilados por Lucarelli (1997). Tanaka (1990) comenta que a conservação do perfil do solo é importante para a manutenção da eficiência do uso da água pelas culturas.

5. Conclusões

- Os sistemas de preparo motomecanizados afetaram significativamente os seguintes parâmetros físicos de solo: textura, densidade de partículas, densidade do solo, capacidade de infiltração, porosidade total, macro e microporosidade, resistência do solo à penetração, lâmina total de água disponível;
- Os sistemas de preparo motomecanizados do solo desenvolvidos sob o mesmo manejo de água afetaram significativamente a produção, sendo o tratamento escarificador aquele que apresentou resultados significativamente superiores;
- Não houve diferença significativa no consumo de água entre os tratamentos submetidos ao mesmo manejo da água devido à semelhança dos parâmetros de crescimento ao longo do ciclo, contudo, houve diferença significativa na eficiência do uso da água, com melhor desempenho do tratamento conservacionista escarificador;
- A pequena variação entre os resultados observados do consumo de água do feijoeiro, em condições de campo, e aqueles simulados permite concluir sobre a adequabilidade da utilização de uma única curva de coeficiente de cultura parametrizada em função do desenvolvimento da planta;
- Os resultados de solo levam a concluir que os parâmetros que melhor qualificaram o desempenho superior do sistema escarificador, com relação à produção do feijoeiro e eficiência do uso da água, foram a distribuição de poros ao longo do perfil, incluindo a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade; a permeabilidade; a profundidade da camada compactada associada ao menor gradiente de resistência do solo à penetração ao longo do perfil;
- Os resultados de balanço hídrico e de monitoramento de estresse das plantas permitem concluir que dentre os parâmetros que contribuíram para o desempenho superior do sistema escarificador, tem-se a melhor distribuição em profundidade do sistema

radicular, a qual levou à maior exploração da água ao longo do perfil do solo e ao conseqüente menor índice de estresse hídrico acumulado pela cultura, fator este significativamente relacionado com a produção e eficiência do uso da água do feijoeiro.

6. Referências Bibliográficas

- AASE, J.K., PIKUL, J.L. Crop and soil response to long-term tillage aspects practices in the northern great plains. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.87, n.4, p. 652-56, 1995.
- AHUJA, L.R., NIELSEN, D.R. Field soil-water relations. In: STEWART, B.A., NIELSEN, D.R. (ed.) **Irrigation of agricultural crops**. Madison, WI: ASA. Agronomy Monograph, 30. 1990. Cap. 7, p. 143-189.
- ALBUQUERQUE, J.A., REINERT, D.J., FIORIN, J.E., RUEDELL, J., PETRERE, C., FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma de estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19: 115-119, 1995.
- ALEMÁN, F. Common bean response to tillage intensity and weed control strategies. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 93, p. 556-563, 2001.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requiremens**. Roma: FAO, 1998. 300 p. Paper 56.
- AMOOZEGAR, A., WARRICK, A.W. Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. In: KLUTHE, A. (ed.) **Methods of soil analysis: part 1. Physical and mineralogical methods**. 2.ed., Madison, WI: American Society of Agronom, Inc., Soil Science Society of América, Inc., 1986. 926p. p.735-770.
- AMORIM NETO, M.S. Índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria – RS, v.4, n.1, p.49-53, 1996.
- ANJOS, J.T., UBERTI, A.A.A., VIZZOTO, V.J., LEITE, G.B., KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.139-145, 1994.
- ARRUDA, F.B., FUJIWARA, M., CALHEIROS, R.O., PIRES, R.C.M., SAKAI, E. A agricultura irrigada ante a administração dos recursos hídricos do Estado de São Paulo. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 15, n. 2, p. 343-364, 1994.
- ARRUDA, F.B. Determinação da cobertura do solo durante o ciclo das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, p.145-150, 1984.

- ARZENO, J.L. **Avaliação física de diferentes manejos de solo em um latossolo roxo - distrófico**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 259 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1990.
- AZOOZ, R.H., ARSHAD, M.A. Effect of tillage and residue management on barley and canola growth and water use efficiency. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.78, n. 4, p.649-56, 1998.
- BARROS, L.C.G., HANKS, R.J. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch and irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 85, p. 692-697, 1993.
- BASCUR, G.A.B., OLIVA, M.A., LAING, D. Termometria infraroja en selección de genótipos de frijol resistentes a la sequia. II Bases fisiológicas. **Turrialba**, v. 35, n. 1, p. 43-47, 1985.
- BEN-ASHER, J., PHENE, C.J., KINARTI, A. Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, Netherlands, v. 22, p. 379-390, 1992.
- BERG, V., HSIAO, T. C. Solar tracking : light avoidance induce by water stress in leaves of kidney beans seedings in the field. **Crop Science**, v. 26, p. 980 - 986.
- BERTOL, I., BEUTLER, J.F., LEITE, D., BATISTELA, O. propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo mde manejo do solo. **Scientia Agricola**, v. 58, n.3, p.555-60, 2001.
- BERTOLANI, F.C., VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.987-95, 2001.
- BEUTLER, A.N., SILVA, M.L.N., CURI, N., FERREIRA, M.M., CRUZ, J.C., PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.167-77, 2001.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 189p.
- BORDOVSKY, D.G., CHOUDHARY, M., GERARD, C.J. Effect of tillage, cropping, and residue management on soil properties in the Texas rolling plains. **Soil Science**, v.164, n.5, p. 253-263, 1986.
- BRALTS, V.F., EDWARDS, D.M. Field evaluation of drip irrigation submain units. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.29, n.6, p.1659-64, 1986.
- BRESLER, E., DAGAN, G. Variability of yield of an irrigated crop and its causes 2. Input data and illustration of results. **Water Resources Research**, v.24, n.3, p.389-94, 1988.

- BRUCE, R.R., LANGDALE, G.W., DILLARD, A.L. Tillage and crop rotation effect on characteristics of a sandy surface soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, 54: 1744-1747, 1990.
- BULISANI, E.A., ALMEIDA, L.D'A. Feijão : *Phaseolus vulgaris* L. In: JORGE, J.A., LOURENÇÃO, A.L., ARANHA, C. (ed.). **Instruções agrícolas para o Estado de São Paulo**. 5. ed. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 1990. 233 p. p.94-95. (Boletim, 200).
- BULISANI, E.A., ALMEIDA, L. D'A., ROSTON, A. J. A cultura do feijoeiro no Estado de São Paulo. In: BULISANI, Eduardo Antonio (coord.). **Feijão fatores de produção e qualidade**. Campinas, SP : Fundação Cargill, 1987. 326 p. p.29 - 88.
- CALVACHE, A.M., REICHARDT, K., MALAVOLTA, E., BACCHI, O.O.S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso da água em uma cultura do feijão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n.3, p.232-40, set/dez, 1997.
- CAMARGO, O. A. de, MONIZ, A. C., JORGE, J. A., VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, SP : Instituto Agrônomo, 1986. 94 p. (Boletim, 106)
- CARVALHO, E.J.M., FIGUEIREDO, M.S., COSTA, L.M. Comportamento físico hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p. 257-265, fev. 1999.
- CASTRO, O.M. **Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. Piracicaba: ESALQ, 1995. 174 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ, USP, 1995.
- CENTURION, J.F., DEMATTÊ, J.L.I. Sistemas de preparo de solos de cerrado: efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.2, p. 315-324, fev. 1992.
- CHAGAS, J.M., GOMES, J.M., VIEIRA, C., ARAUJO, G.A.A. Efeitos de quantidades de água sobre a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em quatro sistemas de manejo do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 41, n. 238, p.641-50, 1994.
- CLAWSON, K.L., BLAD, B.L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 74, p. 311-316, 1982.
- COELHO FILHO, M.A. **Variabilidade espacial aplicada ao manejo de irrigação por microaspersão em lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tanaka)**. 1998. 97p. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- CORSINI, P.C., FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p. 289-98, fev. 1999.
- DANIEL, L.A., ESPÍNDOLA, C.R., LUCARELLI, J.R.F., MAIA, J.C.S. A mecanização e conservação do solo na FEAGRI/UNICAMP. In: Seminário ciência e desenvolvimento sustentável. **Resumos Expandidos...** São Paulo, 1997. p.119-120.
- DANIEL, L.A., SVERZUT, C.B., LUCARELLI, J.R.F. Effects of different agricultural mechanization systems on compacted soil layer formation. In: AgEng96, International Conference on Agricultural Engineering. **Anais...** Madrid, 23 a 26 de setembro de 1996, v.1, p.134-35.
- DE MARIA, I., CASTRO, O.M., DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 703-709, 1999.
- DENMEAD, O.T., SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 43, p. 385-390, 1962.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, M. & ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam v.8, p.253-263, 1986.
- DOORENBOS, J., KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Rome : FAO, 1979. 193 p. Paper n. 33.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma : FAO, 1976. 194 p. Paper n. 24.
- DOURADO NETO, D., LIER, Q. de J.V., BOTREL, T.A., LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Van Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.1, n.2, p.92-102, 1990.
- DUMANSKI, J., ROLOFF, G., GAMEDA, S., de JONG, R. Application of information technology for the sustainable management of land resources. In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997. 22p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999. 412p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - CNPS. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do abastecimento, 1997. 212p.
- FIETZ, C.R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. 1998. 97p. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FOLEGATTI, M.V. **Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso**. 1996. 84p. Tese (Livre Docência, Especialidade em Engenharia de Água e Solo, Conjunto de disciplinas Hidráulica e Irrigação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FOLEGATTI, M.V. **Avaliação do desempenho de um “scheduler” na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigada com diferentes lâminas**. Piracicaba: ESALQ, 1988. 188 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1988.
- FUJIWARA, M., KURACHI, S.A.H., ARRUDA, F.B., PIRES, R.C.M., SAKAI, E. **A técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1994. 9p. (Boletim Técnico, 153)
- GHAFFARZADEH, M., PRÉCHAC, F.G., CRUSE, R.M. Tillage effect on soil water content and corn yield in a strip intercropping system. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 89, p. 893-99, 1997.
- GOMES, A.A., ARAÚJO, A.P., ROSSIELO, R.O.P., PIMENTEL, C. Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.1927-37, 2000.
- GÓMEZ, J.A., GIRÁLDEZ, J.V., PASTOR, M., FERERES, E. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.52, p. 167-175, 1999.
- GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação**. 1997. 118p. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GRANT, C.A., LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, n. 2, p.223-32, 1993.

- GUANDIQUE, M.E.G. **Balanço hídrico no solo e consumo de água pela cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado.** 1993. 94 p. Tese (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de agricultura “Luiz de Queirós”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GUERRA, A.F., SILVA, D.B., RODRIGUES, G.C. Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada para o feijoeiro na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.6, p.1229-36, 2000.
- GUIMARÃES, C.M., STONE, L.F., BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca II. Produtividade e componentes agronômicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.7, p.481-88, 1996.
- GUIMARÃES, E.C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** 2000. 90 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- GUIMARÃES, E.C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo.** 1993. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.
- HALTERLEIN, A. J. Bean. In : TEARE, I. D., PEET, M. M. **Crop water relations.** New York : John Wiley & Sons, 1983. p. 157-186.
- HATFIELD, J.L., SAVER, T.J., PRUEGER, J.H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 93, p. 271-80, 2001.
- HILL, R.L. Long-term conventional tillage and no-tillage effects on selected soil physical properties, **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 54, n.1, p.161-66, 1990.
- HILLEL, D. Role of irrigation in agricultural systems. In: STEWART, B.A., NIELSEN, D.R. (ed.) **Irrigation of agricultural crops.** Madison: ASA. Agronomy Monograph, 30. 1990. Cap. 2, p. 5-30.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics.** New York, Academic Press, 1998. 771p.
- HUNT, Roderick. **Plant growth analysis.** London : Institute of Biology's, 1970. v. 96, 67 p. (Studies in Biology).
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D., REGINATO, R.J. Remote sensing of crop yields. **Science**, Washington, v.19, n.6, p. 19-25, 1977.
- IMHOFF, S., SILVA, A.P., TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

- JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D., ed. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982. v.1, p.43-85.
- JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., IDSO, S.B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, Washington, v.13, n.3, p.651-6, 1977.
- JENSEN, M.E., RANGELEY, W.R., DIELEMAN, P.J. Irrigation trends in world agriculture. In : STEWART, B. A., NIELSEN, D. R. (ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1990. 1195 p. p. 31-67. (Agronomy, n. 30)
- JOHNSON, D. **Applied multivariate methods for data analysis**. Brooks Cole, Pacific Grove, California. 1988. 567p.
- KATSVAIRO, T., COX, W.J., van ES, H. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.94, p. 299-304, 2002.
- KLUTHCOUSKI, J., FANCELLI, A.L., DOURADO-NETO, D., RIBEIRO, C.M., FERRARO, L.A. Manejo do solo e o rendimento da soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n.1, p.97-104, jan/mar 2000.
- LAING, D.R., JONES, P.G., DAVIS, H.C. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: GOLDSWORTHY, P.R., FISHER, N.M. (ed.) **The physiology of tropical field crops**. New York: Wiley – Interscience, 1984. cap. 9, p.305-49.
- LEME, E.J.A., MATTOS, A., MANIERO, M.A. Coeficiente basal e evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p. 36-46, 1997.
- LIBARDI, P.L., SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.529-32, 1994.
- LIMA, C.A.G., SILANS, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2311-20, 1999.
- LUCARELLI, J.R.F., ESPÍNDOLA, C.R., DANIEL, L.A. Estabilidade e distribuição dos agregados em oito diferentes sistemas de preparo e manejo do solo. In: XII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e Água. **Resumos Expandidos...** Fortaleza, 1998. p. 207-08.
- LUCARELLI, J.R.F. **Alterações em características de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 1997. 135 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- LUCARELLI, J.R.F., DANIEL, L.A., GUIMARÃES, E.C., SVERZUT, C.B. Different soil tillage systems influence in soil loss by erosion. In: AgEng96, International Conference on Agricultural Engineering. **Anais...** Madrid, 23 a 26 de setembro de 1996, v.2, p.757-58.
- MAIA, J.C.S. **Determinação de esquemas de amostragem para avaliação de propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de preparo.** 1999. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MARTHALER, H.P., VOGELSANGER, W., RICHARD, F., WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometer. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.47, p.624-630, 1983.
- MEDEIROS, G.A., ARRUDA, F.B., SAKAI, E., FUJIWARA, M., BONI, N.R. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.49, n.3, p. 215-28, 2001.
- MEDEIROS, G.A., ARRUDA, F.B., SAKAI, E., FUJIWARA, M., BONI, N.R. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1733-42, 2000.
- MEDEIROS, G.A.; ARRUDA, F.B. Adaptação e avaliação de evapotranspirômetros para a obtenção do coeficiente de cultura basal (kcb) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Irriga**, Botucatu, v. 3, n. 3, p. 137-150, 1998.
- MEDEIROS, G.A., ARRUDA, F.B. Uso consuntivo da agricultura irrigada: necessidade de novas abordagens na pesquisa. In: **Seminário Ciência e Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo : Instituto de Estudos Avançados, USP, 1997. 337 p. p. 63 – 68
- MEDEIROS, G.A. **Influência do desenvolvimento do dossel vegetativo sobre o consumo de água e coeficiente de cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).** 1996. 135 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MELLO, A.C.A. **Efeito do dossel vegetativo na estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura da ervilha (*Pisum sativum* L.).** Piracicaba: ESALQ, 1992. 76 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1992.
- MIELKE, L.N., WILHELM, W.W. Comparisons of soil physical characteristics in long-term tillage winter wheat-fallow tillage experiments. **Soil & Tillage Research**, v.49, p. 29-35, 1998.

- MORAES, M.H., VILLAS BOAS, R.L., BENEZ, S.H., BREDÁ, C.C., ELIAS JUNIOR, R.C., LUNA, P.E.V., PRADO FILHO, R.S. Desenvolvimento de raízes de feijão em solo com camada de impedimento subsuperficial. In: CONGRESO LATINO AMERICANO DE INGENIERIA AGRICOLA, AVANCES EM EL MANEJO DEL SUELO Y AGUA EM LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA. 2, 1998, La Plata. **Anais...** La Plata: Editorial de La UNPL., 1998, p. 149-53.
- MOUHOUCHE, B., RUGET, F., DELÉCOLLE, R. Effects of water stress applied at different phenological phases on yield components of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agronomie**, Paris, v.18, p.197-205, 1998.
- MUALÉN, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513 - 22, 1976.
- MÜLLER, M.M.L., CECCO, G., ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.531-538, 2001.
- NIELSEN, D.C., NELSON, N.O. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. **Crop Science**, Madison, WI, v. 38, p.422-27, 1998.
- NIELSEN, D.R., KUTÍLEK, M., PARLANGE, M.B. Surface soil water content regimes: opportunities in soil science. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.184, p.35-55, 1996.
- OLIVEIRA, F.A., SILVA, J.J.S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijoeiro irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n.3, p. 317-322, março 1990.
- OLIVEIRA, J.O.A.P., VIDIGAL FILHO, P.S., TORMENA, C.A., PEQUENO, M.G., SCAPIM, C.A., MUNIZ, A.S., SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, CRANTZ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.443-450, 2001.
- OLIVEIRA, J.B. & ROTTA, C.L. **Levantamento pedológico semidetalhado dos solos do Estado de São Paulo. Quadricula de Campinas**. Rio de Janeiro, IBGE, 169p. 1979.
- PATGIRI, D.K., BARUAH, T.C. Spatial variability of total porosity, air entry potential and saturation water content in a cultivated inceptisol. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.27, p. 1-9, 1995.
- PAZZETTI, G.B., OLIVA, M.A., LOPES, N.F. Aplicação da termometria ao infravermelho à irrigação do feijoeiro: crescimento e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 12, p. 1371-1377, 1993.

- PEDROTTI, A., PAULETO, A.E., GOMES, A.S., TURATTI, A.L., CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p. 709-15, abr. 2001a.
- PEDROTTI, A., PAULETO, E.A., CRESTANA, S., FERREIRA, M.M., DIAS JUNIOR, M.S., GOMES, A.S., TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.521-529, 2001b.
- PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, v. 16, n. 4, p. 118-143, 1997.
- PERRIER, A. Updated evapotranspiration and crop water requirement definitions. In : **Les besoins en eau des cultures. Crop water requirements**. Paris : INRA Publications, 1984. 927 p. p. 885-887.
- PIKUL, J.L., AASE, J.K. Infiltration and soil properties as affected by annual cropping in the northern great plains. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.87, n.4, p. 656-62, 1995
- PINZAN, N.R., BULISANI, E.A., BERTI, A.J. **Feijão – zoneamento ecológico e épocas de semeadura para o Estado de São Paulo**. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1994. 19 p. ilus. (Boletim Técnico, 218).
- PIRES, R.C.M., ARRUDA, F.B., FUJIWARA, M., SAKAI, E., BORTOLETTO, N. Profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. **Bragantia**, Campinas, v.50, n.1, p.153-162, 1991.
- RAIJ, B van & QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81).
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.211-216, 1988.
- REICHARDT, K., VIEIRA, S.R., LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.1-6, 1986.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4 ed. rev. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445 p.
- REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E. A method for simultaneous in situ measurements in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship. **Ground Water Monitoring Review**. v.6, p.84-95, 1986.

- ROSOLEM, C.A., FERNANDEZ, E.M., ANDREOTTI, M., CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n.5, p. 821-28, maio 1999.
- ROTH, C.H. & MEYER, B. Infiltrabilidade de um Latossolo roxo distrófico durante o período vegetativo da soja sob preparo convencional, escarificação e plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 19, Curitiba, 1983. **Programas e Resumos**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983, p.108.
- SAKAI, Emílio. Balanço hídrico e energético na cultura irrigada do feijoeiro em Latossolo roxo. Piracicaba: ESALQ, 1989. 121p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1989.
- SALIH, A.A., BABIKIR, H.M., ALI, S.A.M. Preliminary observations on effects of tillage systems on soil physical properties, cotton root growth and yield in Gezira Scheme, Sudan. **Soil & Tillage Research**, v.61, p. 193-202, 2001.
- SALVIANO, A.A.C., VIEIRA, S.R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.699-707, 1998.
- SANTOS, A.B., SILVA, O.F., FERREIRA, E. Avaliação de práticas culturais em um sistema agrícola irrigado por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n.3, p. 317-327, mar. 1997.
- SÃO PAULO (Estado), CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CRH). **Plano Estadual de Recursos Hídricos: primeiro plano do Estado de São Paulo**. São Paulo : DAEE, 1990. 137 p.
- SAS. **Statistical Analysis Systems, version 6.02**. North Caroline: SAS Institute Inc, 1986. Disquete 3 1/2".
- SAS **Sas user's guide** : Basics. North Caroline: SAS Institute Inc, 1982.
- SHAPIRO, S. S. & WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika**, v 52, p.591-611, 1965.
- SHARRAT, B.S. Barley yield and evapotranspiration governed by tillage practices in interior Alaska. **Soil & Tillage Research**, v.46, p. 225-29, 1998.
- SILVA, M.L.N., CURI, N., BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.12, p. 2485-92, dez. 2000.

- SILVEIRA, P.M., SILVA, O.F., STONE, L.F., SILVA, J.G. Efeitos do preparo do solo, plantio direto e de rotações de culturas sobre o rendimento e a economicidade do feijoeiro irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 2, p. 257-63, fev. 2001.
- SILVEIRA, P.M., SILVA, S.C., SILVA, O.F., DAMACENO, M.A. Estudo de sistemas agrícolas irrigados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 8, p. 1243-1252, ago. 1994.
- SOUZA, Z.M., SILVA, M.L.S., GUIMARÃES, G.L., CAMPOS, D.T.S., CARVALHO, M.P., PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.699-707, 2001.
- SOUZA, L.S., COGO, N.P., VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.367-372, 1997.
- STOCKLE, C.O., DUGAS, W.A. Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v. 13, p. 31-37, 1992.
- STONE, L.F., SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.395-401, 2001.
- STONE, L.F., MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistema de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.4, p. 835-841, abr. 2000.
- STONE, L.F., SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n.1, p. 83-91, jan. 1999.
- STONE, L.F., PEREIRA, A.L. Sucessão arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos de espaçamento entre linhas, adubação e cultivar no crescimento, desenvolvimento radicular e consumo d'água do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.6, p.939-54, 1994.
- TABOADA, M.A., MICUCCI, F.G., COSENTINO, D.J., LAVADO, R.S. Comparasion of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. **Soil & Tillage Research**, v.49, p. 57-63, 1998.
- TANAKA, D.L. Topsoil removal influences on spring wheat water-use efficiency and nutrient concentration and content. **Transactions ASAE**, St Joseph, MI, V.33, n.5, p.1518-24, 1990.

- TAVARES FILHO, J., BARBOSA, G.M.C., GUIMARÃES, M.F., FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.725-730, 2001.
- TEIXEIRA, M.A. **Desenvolvimento de equipamento para extração de amostras indeformadas de solo**. 1998. 98 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- TORMENA, C.A., ROLOFF, G., SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.301-09, 1998.
- TRIOLA, M. F. **Introdução a estatística**. 7^a ed. Livros Técnico e Científicos, Rio de Janeiro. 410p. 1999. (Copyright 1998 Elementary Statistics, Addison Wesley. Trad. Alfredo Alves de Farias, Eliana Farias e Soares e Vera Regina L. F. Flores.)
- TSEGAYE, T., HILL, R.L. Intensive tillage effects on spatial variability on soil physical. **Soil Science**, v.163, n.2, p.143-154, fev. 1998.
- TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1977.
- UNGER, P.W., JONES, O.R. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.45, p.39-57, 1998.
- URCHEI, M.A., RODRIGUES, J.D., STONE, L.F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.3, p.497-506, 2000.
- URCHEI, M.A., RODRIGUES, J.D., STONE, L.F., CHIEPPE JR., J.B. Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um Latossolo vermelho-escuro argiloso, sob pivô central. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.3, 1996.
- UTSET, A., CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsolo at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, v.61, p. 193-202, 2001.
- VAN GENUTCHEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-8, 1980.
- VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo oxo em Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

- WARRICK, A.W. Spatial variability. In : HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York : Academic Press, 1998. p. 655-675.
- WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Proceedings of the ASCE, New York, v. 108, n. IR1, p. 57-74, mar 1982.
- _____. Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration. In: **Irrigation scheduling for water & energy conservation in the 80's**, 1981, Chicago. Proceedings of the irrigation scheduling conference. St Joseph: ASAE, 1981. 231 p. p. 18-26.
- WUTKE, E.B., ARRUDA, F.B., FANCELLI, A.L., PEREIRA, J.C.V.N.A., SAKAI, E., FUJIWARA, AMBROSANO, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.621-33, 2000.
- WUTKE, E.B. **Desempenho do feijoeiro em rotação com milho e adubos verdes**. Piracicaba: ESALQ, 1998. 146 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ, USP, 1998.
- XU, C., PIERCE, F.J. Dry bean and soil response to tillage and row spacing. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, p. 393-399, 1998.
- XU, D., MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil & Tillage Research**, v.60, p. 11-19, 2001.
- ZAFFARONI, E., BARROS, H.H. de A., NÓBREGA, J.A.M., LACERDA, J.T. de, SOUZA JUNIOR, V.E. Efeito de métodos de preparo do solo na produtividade e outras características agrônômicas de milho e feijão no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 99-104, 1991.

ANEXOS

Tabela 1A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo para as variáveis de solo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		
			Numerador	Denominador	prob(F>F _c)
Sistema preparo solo (SPS)	0,1279	16,39	27	433	0,0001

Tabela 2A. Resultados de textura de um Latossolo vermelho para os tratamentos de preparo do solo na profundidade de 0 a 0,20 m, em Campinas – SP, 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	d	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
----- g kg ⁻¹ -----													
Teor de Argila													
Escarifi.	548,6b	550,0	513,0	570,5	540,8	556,2	15,5	517,5	579,5	12,1	2,21	0,916	*
P Direto	529,2c	527,3	482,5	630,0	519,5	541,5	22,0	486,5	574,5	26,5	5,01	0,919	*
A. Disco	549,6b	547,5	510,5	594,5	538,7	563,9	25,1	501,1	601,6	21,3	3,87	0,948	ns
Rotavaç.	569,8a	567,2	519,0	621,5	557,5	583,8	26,3	518,1	623,1	22,4	3,93	0,975	ns
Diferença mínima significativa = 9,39 g kg ⁻¹													
Teor de Silte													
Escarifi.	181,6bc	182,3	160,5	207,0	175,0	187,8	12,9	155,7	207,2	10,7	5,87	0,926	*
P Direto	188,7ab	189,5	124,0	224,0	176,9	203,3	26,4	137,3	242,8	21,1	11,16	0,919	*
A. Disco	178,2c	179,0	141,5	219,0	167,1	189,0	21,9	134,3	221,8	18,5	10,37	0,961	ns
Rotavaç.	189,4a	189,3	145,5	241,0	178,6	197,5	18,9	150,3	225,8	18,1	9,57	0,960	ns
Diferença mínima significativa = 7,73 g kg ⁻¹													
Teor de Areia Fina													
Escarifi.	146,0b	145,0	130,0	160,0	140,0	150,0	10,0	125,0	165,0	7,4	5,10	0,818	*
P Direto	149,3a	150,0	120,0	170,0	147,5	150,0	2,5	143,8	153,8	8,6	5,76	0,852	*
A. Disco	142,0c	140,0	130,0	150,0	140,0	150,0	10,0	125,0	165,0	6,1	4,28	0,757	*
Rotavaç.	133,0d	130,0	120,0	140,0	130,0	140,0	10,0	115,0	155,0	6,5	4,88	0,764	*
Diferença mínima significativa = 3,19 g kg ⁻¹													
Teor de Areia Grossa													
Escarifi.	123,0b	120,0	110,0	140,0	120,0	130,0	10,0	105,0	145,0	9,7	7,85	0,866	*
P Direto	130,5a	130,0	110,0	150,0	120,0	140,0	20,0	90,0	170,0	8,8	6,71	0,887	*
A. Disco	131,0a	130,0	120,0	150,0	127,5	140,0	12,5	108,8	158,8	8,1	6,18	0,846	*
Rotavaç.	107,0c	110,0	100,0	120,0	100,0	110,0	10,0	85,0	125,0	6,5	6,06	0,764	*
Diferença mínima significativa = 3,68 g kg ⁻¹													

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%,

Tabela 3A. Resultados de densidade do solo para os tratamentos de sistema de preparo escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	LEI	LES	d	DP	CV	W	Sign.
----- kg dm ⁻³ -----											%		
Profundidade 0 – 0,10 m													
Escarific.	1,20	1,19	1,00	1,45	1,11	1,24	0,92	1,44	0,13	0,117	9,76	0,941	*
P. Direto	1,15	1,13	0,96	1,55	1,05	1,24	0,77	1,51	0,19	0,132	11,51	0,946	ns
A. Disco	1,20	1,19	0,80	1,49	1,11	1,29	0,83	1,57	0,19	0,152	12,70	0,957	ns
Rotavaç.	1,09	1,09	0,90	1,56	1,01	1,15	0,80	1,36	0,14	0,124	11,32	0,914	*
Profundidade 0,10 – 0,20 m													
Escarific.	1,31	1,32	1,16	1,43	1,27	1,38	1,11	1,55	0,11	0,069	5,26	0,958	ns
P. Direto	1,31	1,31	1,07	1,59	1,26	1,38	1,08	1,56	0,12	0,104	7,90	0,990	ns
A. Disco	1,29	1,29	1,00	1,46	1,23	1,36	1,03	1,55	0,13	0,091	7,00	0,932	*
Rotavaç.	1,22	1,23	1,01	1,44	1,15	1,27	0,96	1,46	0,13	0,106	8,68	0,972	ns
Profundidade 0,20 – 0,30 m													
Escarific.	1,37	1,37	1,22	1,51	1,33	1,42	1,20	1,56	0,09	0,069	5,00	0,978	ns
P. Direto	1,35	1,35	1,20	1,51	1,30	1,41	1,12	1,58	0,12	0,077	5,70	0,977	ns
A. Disco	1,33	1,32	1,18	1,48	1,29	1,38	1,14	1,52	0,10	0,069	5,15	0,985	ns
Rotavaç..	1,29	1,28	1,09	1,49	1,20	1,37	0,95	1,63	0,17	0,099	7,69	0,962	ns
Profundidade 0,30 – 0,40 m													
Escarific.	1,37	1,37	1,19	1,51	1,33	1,41	1,20	1,54	0,09	0,068	4,98	0,964	ns
P. Direto	1,30	1,30	1,14	1,50	1,24	1,35	1,08	1,52	0,11	0,086	6,62	0,979	ns
A. Disco	1,28	1,28	1,04	1,46	1,23	1,35	1,04	1,54	0,13	0,091	7,08	0,982	ns
Rotavaç.	1,26	1,25	1,14	1,54	1,21	1,30	1,08	1,42	0,09	0,080	6,33	0,917	*

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartílica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade.

Tabela 4A. Estatísticas do teste da Manova e teste exato de F para a densidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,646	6,068	12	405	0,0001
Profundidade (P)	0,394	78,92	3	154	0,0001
SPS*P	0,881	2,232	9	375	0,0001

Tabela 5A. Análise de variância (ANOVA) para a densidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	0,749	0,2498	16,52	0,0001
Erro	156	2,359	0,0151		
Profundidade	3	2,845	0,9483	118,40	0,0001
Erro (Profundidade)	9	0,178	0,0198	2,47	0,0094
Profundidade X SPS	468	3,749	0,0080		

Tabela 6A. Resultados de densidade de partículas verificados para os tratamentos de preparo do solo escarificador, arado de disco e enxada rotativa, na profundidade de 0 a 0,20 m, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	d	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
----- Mg m ⁻³ -----											%		
Escarific.	2,72b	2,74	2,67	2,78	2,70	2,74	0,04	2,64	2,80	0,036	1,34	0,865	*
P. Direto	2,72b	2,70	2,56	2,90	2,67	2,78	0,11	2,50	2,95	0,079	2,90	0,905	*
A. Disco	2,71b	2,70	2,60	2,86	2,67	2,74	0,07	2,57	2,85	0,068	2,49	0,929	*
Rotavaç.	2,76a	2,74	2,67	2,90	2,70	2,82	0,11	2,53	2,99	0,061	2,22	0,883	*

Diferença mínima significativa = 0,02 Mg m⁻³

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%,

Tabela 7A. Resultados de porosidade total do solo observados para os sistemas de preparo
 escarificador, plantio direto, arado de disco e rotavação, na profundidade de 0 a
 0,20 m, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	A	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
----- % (base volume) -----											%		
Escarific	53,94b	54,26	48,65	59,14	51,19	56,25	5,06	43,60	63,84	2,82	5,22	0,951	ns
P. Direto	55,04b	54,87	42,85	62,79	52,68	58,44	5,76	44,04	67,08	4,19	7,61	0,945	ns
A. Disco	54,03b	54,53	46,11	66,78	51,16	56,64	5,48	42,94	64,86	4,14	7,66	0,967	ns
Rotavaç.	58,12a	57,93	47,30	64,26	56,38	58,99	3,60	50,99	65,39	3,51	6,03	0,952	ns

Diferença mínima significativa = 0,02 Mg m⁻³

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%.

Tabela 8A. Parâmetros da regressão do modelo de Van Genuchten (1980) para os
 diferentes tratamentos de sistema de preparo do solo conduzidos em
 Latossolo vermelho, em Campinas –SP, no ano de 1999.

Tratamento	Prof.	Parâmetros				
		α	m	n	θ_r	θ_o
	cm				-----cm ³ cm ⁻³ -----	
Escarificador	0,0 – 0,15	0,094112	0,298733	1,425990	0,234	0,545
	0,15 – 0,30	0,062708	0,298823	1,426174	0,244	0,538
	0,30 – 0,45	0,051929	0,342560	1,521052	0,260	0,573
	0,45 – 0,60	0,043818	0,390130	1,639693	0,242	0,591
P. Direto	0,0 – 0,15	0,035180	0,317487	1,465173	0,251	0,498
	0,15 – 0,30	0,035842	0,332963	1,499168	0,257	0,494
	0,30 – 0,45	0,045943	0,313595	1,456866	0,242	0,521
	0,45 – 0,60	0,041711	0,316505	1,463070	0,230	0,535
A. Disco	0,0 – 0,15	0,046473	0,314899	1,459639	0,231	0,521
	0,15 – 0,30	0,044734	0,315503	1,460927	0,258	0,510
	0,30 – 0,45	0,052718	0,358345	1,558470	0,227	0,546
	0,45 – 0,60	0,047504	0,394059	1,650326	0,211	0,581
Rotavação	0,0 – 0,15	0,038587	0,351826	1,542795	0,208	0,568
	0,15 – 0,30	0,036348	0,318528	1,467412	0,252	0,530
	0,30 – 0,45	0,047387	0,332953	1,499145	0,244	0,552
	0,45 – 0,60	0,050539	0,344125	1,524681	0,234	0,580

Tabela 9A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a porosidade total em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,0505	9,729	12	56	0,0001
Profundidade (P)	0,1243	51,62	3	22	0,0001
SPS*P	0,4549	2,280	9	54	0,0302

Tabela 10A. Análise de variância (ANOVA) para a porosidade total em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	485,56	161,85	68,90	0,0001
Erro	24	56,38	2,349		
Profundidade	3	518,66	172,89	49,94	0,0001
Profundidade X SPS	9	94,34	10,48	3,03	0,0040
Erro (Profundidade)	72	249,28	3,462		

Tabela 11A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a macroporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,122	5,651	12	56	0,0001
Profundidade (P)	0,160	38,57	3	22	0,0001
SPS*P	0,368	3,028	9	54	0,0053

Tabela 12A. Análise de variância (ANOVA) para a macroporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>Fc)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	528,49	176,16	25,79	0,0001
Erro	24	163,95	6,83		
Profundidade	3	810,94	270,31	39,45	0,0001
Profundidade X SPS	9	215,82	23,98	3,50	0,0012
Erro (Profundidade)	72	493,36	6,85		

Tabela 13A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a microporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>Fc)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,197	3,945	12	56	0,0002
Profundidade (P)	0,473	8,179	3	22	0,0008
SPS*P	0,368	3,028	9	54	0,0054

Tabela 14A. Análise de variância (ANOVA) para a microporosidade em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>Fc)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	109,09	36,363	8,27	0,0006
Erro	24	105,53	4,397		
Profundidade	3	40,07	13,355	6,08	0,0010
Profundidade X SPS	9	50,50	5,611	2,55	0,0132
Erro (Profundidade)	72	158,13	2,196		

Tabela 15A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a lâmina total de água disponível no solo em diferentes profundidades e diferentes sistemas de preparo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,273	2,95	12	56	0,0031
Profundidade (P)	0,627	4,35	3	22	0,0150
SPS*P	0,449	2,33	9	54	0,0271

Tabela 16A. Análise de variância (ANOVA) para a lâmina total de água disponível em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	155,526	51,842	5,12	0,0070
Erro	24	243,123	10,130		
Profundidade	3	83,969	27,990	5,15	0,0028
Profundidade X SPS	9	157,786	17,532	3,22	0,0024
Erro (Profundidade)	72	391,483	5,437		

Tabela 17A. Resultados de condutividade hidráulica saturada verificada para os tratamentos de preparo do solo escarificador, plantio direto, arado de disco e rotavação, na profundidade de 0,15 m, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	A	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
	----- mm h ⁻¹ -----										%		
Escarific.	72,0a	67,3	14,5	182,0	47,2	87,3	40,1	-13,1	147,5	34,2	40,15	0,947	ns
P. Direto	74,0a	61,9	10,9	222,0	43,7	96,5	52,8	-35,4	175,6	44,3	59,87	0,885	*
A. Disco	62,2a	51,4	7,2	182,0	29,1	78,3	49,2	-44,6	152,0	43,7	70,32	0,890	*
Enx.Rot.	73,6a	69,2	7,2	244,0	47,3	89,2	41,9	-15,5	151,9	42,9	58,30	0,870	*

Diferença mínima significativa = 18,3 mm h⁻¹

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%.

Tabela 18A. Resultados de infiltração verificados para os sistemas de preparo do solo
 escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, na profundidade
 de 0,15 m, em Campinas – SP, 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	Q ₁	Q ₃	A	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
	----- mm h ⁻¹ -----										%		
Escarif..	283,9a	247,7	82,6	516,1	185,8	371,6	185,8	-92,9	650,3	121,4	42,75	0,926	*
P. Direto	182,7b	175,5	61,9	392,3	103,2	247,7	144,5	-113,5	464,5	90,85	49,72	0,921	*
A. Disco	177,6b	165,2	20,6	412,9	123,9	206,5	82,6	0,0	330,4	95,46	53,76	0,895	*
Rotavaç.	179,1b	165,2	41,3	351,0	123,9	227,1	103,2	-30,9	381,9	74,99	41,87	0,942	ns

Diferença mínima significativa = 42,9 mm h⁻¹

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%.

Tabela 19A. Resultados de umidade volumétrica observada em Latossolo vermelho durante a avaliação do atributo resistência do solo à penetração para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas-SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	1º Q	3º Q	A	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
----- m³ m⁻³ -----											%		
Profundidade 0 – 0,10 m													
Escar.	0,287bc	0,287	0,212	0,363	0,267	0,301	0,034	0,217	0,351	0,033	11,64	0,972	ns
P.Dir.	0,294ab	0,293	0,217	0,405	0,262	0,322	0,060	0,173	0,411	0,041	13,87	0,976	ns
A.D.	0,272c	0,271	0,173	0,363	0,241	0,301	0,061	0,150	0,392	0,044	16,08	0,982	ns
E.R.	0,304a	0,306	0,252	0,419	0,280	0,321	0,041	0,219	0,381	0,034	11,25	0,937	*
Diferença mínima significativa = 0,017 m³ m⁻³													
Profundidade 0,10 – 0,20 m													
Escar.	0,307c	0,311	0,249	0,367	0,282	0,328	0,046	0,212	0,398	0,028	9,10	0,974	ns
P.Dir.	0,323ab	0,325	0,246	0,384	0,300	0,343	0,043	0,235	0,407	0,029	9,09	0,987	ns
A.D.	0,312bc	0,309	0,242	0,368	0,297	0,333	0,036	0,244	0,386	0,025	8,16	0,984	ns
E.R.	0,329a	0,334	0,266	0,388	0,304	0,342	0,038	0,247	0,399	0,028	8,46	0,967	ns
Diferença mínima significativa = 0,012 m³ m⁻³													
Profundidade 0,20 – 0,30 m													
Escar.	0,318bc	0,316	0,253	0,396	0,292	0,340	0,048	0,221	0,411	0,033	10,28	0,986	ns
P.Dir.	0,316c	0,312	0,275	0,381	0,298	0,337	0,039	0,240	0,394	0,025	7,78	0,966	ns
A.D.	0,328b	0,327	0,276	0,365	0,316	0,339	0,024	0,280	0,374	0,018	5,51	0,982	ns
E.R.	0,350a	0,345	0,295	0,402	0,327	0,373	0,046	0,259	0,441	0,027	7,61	0,963	ns
Diferença mínima significativa = 0,012 m³ m⁻³													
Profundidade 0,30 – 0,40 m													
Escar.	0,324b	0,324	0,264	0,393	0,304	0,342	0,038	0,248	0,398	0,027	8,36	0,983	n
P.Dir.	0,310c	0,311	0,261	0,403	0,287	0,327	0,040	0,238	0,386	0,030	9,73	0,958	ns
A.D.	0,329b	0,325	0,279	0,385	0,313	0,346	0,033	0,263	0,395	0,023	7,08	0,971	ns
E.R.	0,352a	0,350	0,305	0,409	0,335	0,366	0,031	0,288	0,412	0,027	7,60	0,966	ns
Diferença mínima significativa = 0,012 m³ m⁻³													

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; Q₁: primeiro quartil; Q₃: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica (Q₃ – Q₁); LEI: limite extremo inferior (Q₁ – 1,5d); LES: limite extremo superior (Q₃+1,5d); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de diferenças mínimas significativas a 5%.

Tabela 20A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo do solo sobre a umidade volumétrica, antes das operações de preparo.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,6049	7,064	12	405	0,0001
Profundidade (P)	0,5038	50,56	3	154	0,0001
SPS*P	0,7779	4,528	9	375	0,0001

Tabela 21A. Análise de variância (ANOVA) para a umidade volumétrica em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo antes das operações de preparo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	0,0683	0,0228	13,15	0,0001
Erro	156	0,2703	0,0017		
Profundidade	3	0,1656	0,0552	87,30	0,0001
Erro (Profundidade)	9	0,0337	0,0037	5,09	0,0001
Profundidade X SPS	468	0,2960	0,0006		

Tabela 22A. Resultados de resistência do solo à penetração verificados em Latossolo vermelho para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	1º Q	3º Q.	A	LEI	LES	DP	CV	W	Sign.
----- MPa -----											%		
Profundidade 0,05 m													
Escarific.	1,09	1,13	0,49	1,96	0,77	1,34	0,56	-0,07	2,18	0,363	33,38	0,961	ns
P. Direto	0,67	0,68	0,20	1,66	0,39	0,88	0,49	-0,34	1,61	0,298	44,13	0,923	*
A. Disco	1,29	1,22	0,29	2,54	0,86	1,66	0,81	-0,35	2,87	0,549	42,68	0,957	ns
Rotavaç.	0,52	0,49	0,20	1,27	0,34	0,68	0,34	-0,17	1,20	0,222	42,88	0,902	*
Profundidade 0,10 m													
Escarific.	1,69	1,65	0,78	3,00	1,27	2,05	0,78	0,10	3,23	0,518	30,64	0,963	ns
P. Direto	1,37	1,37	0,20	3,13	1,08	1,56	0,49	0,34	2,30	0,486	35,59	0,942	ns
A. Disco	1,30	1,32	0,64	2,69	1,03	1,56	0,54	0,22	2,37	0,433	33,31	0,946	ns
Rotavaç.	0,75	0,68	0,20	3,91	0,49	0,78	0,29	0,05	1,22	0,568	76,04	0,547	*
Profundidade 0,15 m													
Escarific.	2,17	1,94	1,08	4,69	1,53	2,51	0,98	0,07	3,98	0,899	41,23	0,868	*
P. Direto	2,13	2,10	0,98	3,52	1,66	2,35	0,68	0,63	3,37	0,623	29,28	0,961	ns
A. Disco	1,50	1,47	0,68	2,68	1,22	1,71	0,49	0,49	2,44	0,477	31,85	0,965	ns
Rotavaç.	1,50	1,47	0,39	2,44	1,03	1,88	0,86	-0,25	3,16	0,556	37,17	0,951	ns
Profundidade 0,20 m													
Escarific.	2,68	2,41	1,04	5,15	1,82	3,25	1,42	-0,31	5,39	1,171	43,69	0,903	*
P. Direto	2,67	2,64	0,49	6,35	1,96	3,25	1,30	0,01	5,19	1,064	39,79	0,928	*
A. Disco	2,28	2,25	0,59	5,62	1,93	2,65	0,72	0,85	3,73	0,853	37,44	0,899	*
Rotavaç.	2,14	2,05	0,93	6,84	1,56	2,36	0,79	0,37	3,55	0,985	45,93	0,742	*
Profundidade 0,25 m													
Escarific.	3,51	3,32	1,56	5,67	2,50	4,68	2,17	-0,74	7,94	1,271	36,19	0,934	*
P. Direto	2,96	2,89	0,68	6,06	2,32	3,62	1,30	0,38	5,56	1,154	39,02	0,953	ns
A. Disco	2,80	2,57	1,27	6,84	2,32	3,03	0,71	1,26	4,09	1,066	38,02	0,773	*
Rotavaç.	2,17	1,96	1,22	5,67	1,60	2,35	0,75	0,48	3,46	0,869	40,05	0,770	*

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; 1º Q: primeiro quartil; 3º Q: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica ($Q_3 - Q_1$); LEI: limite extremo inferior ($Q_1 - 1,5d$); LES: limite extremo superior ($Q_3 + 1,5d$); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade.

Tabela 22A. Resultados de resistência do solo à penetração verificados em Latossolo vermelho para os tratamentos escarificador, plantio direto, arado de disco e enxada rotativa, em Campinas – SP, no ano de 1999. (continuação)

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	1º Q	3º Q.	A	LI	LS	DP	CV	W	Sign.
----- MPa -----											%		
Profundidade 0,30 m													
Escarific.	3,98	3,96	1,76	5,83	2,92	5,15	2,22	-0,41	8,48	1,248	31,37	0,929	*
P. Direto	3,11	2,93	1,47	5,87	2,35	3,62	1,27	0,44	5,52	1,143	36,79	0,904	*
A. Disco	2,56	2,35	0,88	5,18	2,05	2,74	0,69	1,03	3,76	0,907	35,44	0,895	*
Rotavaç.	1,98	1,81	1,03	3,62	1,47	2,25	0,78	0,29	3,42	0,659	33,25	0,852	*
Profundidade 0,35 m													
Escarific.	3,74	3,90	1,73	5,62	3,09	4,46	1,37	1,03	6,52	0,981	26,22	0,973	ns
P. Direto	2,99	2,74	1,27	5,57	2,32	3,35	1,02	0,78	4,89	1,044	34,96	0,940	*
A. Disco	2,30	2,28	0,88	4,59	1,76	2,54	0,78	0,59	3,71	0,771	33,45	0,917	*
Rotavaç.	1,91	1,64	1,03	4,11	1,37	2,27	0,90	0,01	3,63	0,769	40,29	0,863	*
Profundidade 0,40 m													
Escarific.	3,37	3,42	1,47	5,37	2,83	3,89	1,06	1,25	5,48	0,825	24,52	0,992	ns
P. Direto	2,93	2,69	1,47	5,67	2,15	3,47	1,32	0,17	5,45	1,028	35,12	0,915	*
A. Disco	2,11	2,05	1,03	4,11	1,54	2,54	1,00	0,04	4,04	0,705	33,38	0,939	*
Rotavaç.	1,95	1,76	0,68	3,81	1,44	2,35	0,90	0,09	3,70	0,728	37,43	0,947	ns
Profundidade 0,45 m													
Escarific.	3,02	3,05	1,47	4,55	2,70	3,45	0,75	1,57	4,57	0,665	22,00	0,981	ns
P. Direto	2,62	2,54	1,08	5,18	1,96	3,01	1,05	0,38	4,58	0,938	35,74	0,954	ns
A. Disco	2,05	2,05	1,08	3,62	1,56	2,35	0,78	0,39	3,52	0,608	29,66	0,899	*
Rotavaç.	2,06	2,01	0,88	3,62	1,47	2,54	1,08	-0,14	4,15	0,735	35,66	0,930	*
Profundidade 0,50 m													
Escarific.	2,78	2,74	1,50	4,64	2,47	3,07	0,60	1,56	3,98	0,591	21,30	0,969	ns
P. Direto	2,61	2,44	1,17	5,18	2,03	2,98	0,95	0,60	4,41	0,959	36,77	0,934	*
A. Disco	1,96	1,96	1,03	3,23	1,56	2,25	0,69	0,54	3,27	0,551	28,04	0,958	ns
Rotavaç.	2,18	2,30	0,68	3,62	1,56	2,47	0,90	0,21	3,82	0,674	30,86	0,954	ns

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; 1º Q: primeiro quartil; 3º Q: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica ($Q_3 - Q_1$); LEI: limite extremo inferior ($Q_1 - 1,5d$); LES: limite extremo superior ($Q_3 + 1,5d$); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade.

Tabela 23A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, antes das operações de preparo

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Graus de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,212	10,02	30	432	0,0001
Profundidade (P)	0,181	74,26	9	148	0,0001
SPS*P	0,294	8,353	27	433	0,0001

Tabela 24A. Análise de variância (ANOVA) para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, antes das operações de preparo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	268,15	89,38	23,99	0,0001
Erro	156	581,15	3,73		
Profundidade	9	675,17	75,02	227,96	0,0001
Erro (Profundidade)	27	90,76	3,36	10,21	0,0001
Profundidade X SPS	1404	462,04	0,33		

Tabela 25A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a umidade em base peso, na época da colheita.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Graus de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,4987	0,9154	10	22	0,5368
Profundidade (P)	0,0783	35,294	4	12	0,0001
SPS*P	0,5195	1,1624	8	24	0,3608

Tabela 26A. Análise de variância (ANOVA) para a umidade em base peso em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>Fc)
Sistema de preparo do solo (SPS)	2	20,11	10,53	0,25	0,7801
Erro	15	597,30	39,82		
Profundidade	4	256,77	64,19	75,45	0,0001
Profundidade X SPS	8	6,01	0,75	0,88	0,5359
Erro (Profundidade)	60	51,05	0,85		

Tabela 27A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Graus de liberdade		prob(F>Fc)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo solo (SPS)	0,0414	1,306	24	8	0,364
Profundidade (P)	0,0419	10,382	11	5	0,009
SPS*P	0,0575	1,441	22	10	0,280

Tabela 28A. Análise de variância (ANOVA) para a resistência do solo à penetração em diferentes profundidades dentro do sistema de preparo do solo, na época da colheita.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>Fc)
Sistema de preparo do solo (SPS)	2	8,167	4,084	2,33	0,1319
Erro	15	26,344	1,756		
Profundidade	11	51,525	4,684	32,18	0,0001
Profundidade X SPS	22	9,778	0,444	3,05	0,0001
Erro (Profundidade)	165	24,013	0,146		

Tabela 29A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do sistema de preparo do solo para a densidade de raízes.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo do solo(SPS)	0,243	1,550	18	43	0,1196
Profundidade (P)	0,064	46,84	5	16	0,0001
SPS*P	0,383	1,236	15	45	02825

Tabela 30A. Análise de variância (ANOVA) para medidas repetidas da densidade de raízes em diferentes profundidades dentro de sistema do preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	0,1671	0,0557	6,75	0,0025
Erro	20	0,1651	0,0083		
Profundidade	5	0,6781	0,1356	20,69	0,0001
Profundidade X SPS	15	0,0781	0,0052	0,79	0,6806
Erro (Profundidade)	100	0,6555	0,0066		

Tabela 31A. Resultados de altura de planta do feijoeiro para os tratamentos de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, por data, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	1º Q	3º Q.	LEI	LES	d	DP	CV	W	Sign.	n
%														
17 dias após a emergência														
Alternad.	16,0	16,0	15,0	17,0	15,0	17,0	12,0	20,0	2,0	0,82	5,10	0,837	*	10
Escarific.	17,0	17,0	15,0	19,0	17,0	17,0	17,0	17,0	0,0	1,05	6,20	0,867	ns	10
A. Disco	16,4	16,5	14,0	18,0	16,0	17,0	14,5	18,5	1,0	1,26	7,71	0,931	ns	10
Rotavaç.	15,0	15,0	14,0	16,0	14,0	16,0	11,0	19,0	2,0	0,82	5,44	0,837	*	10
24 dias após a emergência														
Alternad.	21,0	21,0	14,0	27,0	19,0	23,0	13,0	29,0	4,0	2,99	14,24	0,961	ns	60
Escarific.	21,4	22,0	14,0	29,0	20,0	23,0	15,5	27,5	3,0	2,47	11,55	0,970	ns	60
A. Disco	21,9	22,0	15,0	27,0	20,0	24,0	14,0	30,0	4,0	2,56	11,67	0,959	ns	60
Rotavaç.	15,7	15,0	10,0	20,0	14,5	17,0	10,8	20,8	2,5	2,20	14,04	0,956	ns	60
32 dias após a emergência														
Alternad.	29,1	29,0	21,0	35,0	27,0	31,0	21,0	37,0	4,0	2,87	9,86	0,975	ns	60
Escarific.	30,9	31,0	24,0	38,0	29,0	33,0	23,0	39,0	4,0	3,02	9,79	0,975	ns	60
A. Disco	29,2	29,0	23,0	36,0	27,0	31,0	21,0	37,0	4,0	2,89	9,89	0,972	ns	60
Rotavaç.	25,5	25,0	20,0	31,0	24,0	27,0	19,5	31,5	3,0	2,43	9,52	0,961	ns	60
36 dias após a emergência														
Alternad.	36,2	36,0	31,0	42,0	34,0	38,0	28,0	44,0	4,0	2,48	6,86	0,968	ns	60
Escarific.	35,8	35,0	32,0	40,0	34,0	37,5	28,8	42,8	3,5	2,26	6,32	0,904	*	60
A. Disco	34,7	35,0	28,0	41,0	33,0	36,0	28,5	40,5	3,0	2,80	8,07	0,969	ns	60
Rotavaç.	31,6	31,0	23,0	37,0	30,0	34,0	24,0	40,0	4,0	2,90	9,17	0,955	ns	60
41 dias após a emergência														
Alternad.	42,2	42,0	38,0	48,0	40,0	44,0	34,0	50,0	4,0	2,39	5,66	0,954	ns	40
Escarific.	43,5	43,0	39,0	49,0	42,0	45,0	37,5	49,5	3,0	2,90	6,67	0,936	*	40
A. Disco	40,1	40,0	33,0	48,0	39,0	42,0	34,5	46,5	3,0	3,24	8,09	0,933	*	40
Rotavaç.	36,7	36,0	31,0	45,0	35,0	38,0	30,5	42,5	3,0	3,05	8,33	0,969	ns	40

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; 1º Q: primeiro quartil; 3º Q: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica ($Q_3 - Q_1$); LEI: limite extremo inferior ($Q_1 - 1,5d$); LES: limite extremo superior ($Q_3 + 1,5d$); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade, n: número de dados amostrados e analisados.

Tabela 31A. Resultados de altura de planta do feijoeiro para os tratamentos de preparo do solo alternado, escarificador, arado de disco e enxada rotativa, por data, em Campinas – SP, no ano de 1999. (continuação)

Trat.	Média	Med.	Min.	Max.	1º Q	3º Q.	LEI	LES	d	DP	CV	W	Sign.	n
----- cm -----										%				
45 dias após a emergência														
Alternad.	44,4	44,0	40,0	49,0	42,0	46,5	35,3	53,3	4,5	2,61	5,88	0,909	*	60
Escarific.	44,2	44,0	40,0	50,0	43,0	45,0	40,0	48,0	2,0	2,21	4,99	0,928	*	60
A. Disco	43,5	43,0	40,0	51,0	41,0	45,0	35,0	51,0	4,0	2,87	6,59	0,892	*	60
Rotavaç.	41,5	41,0	37,0	47,0	40,0	43,0	35,5	47,5	3,0	1,87	4,52	0,913	*	60
52 dias após a emergência														
Alternad.	48,3	48,0	43,0	54,0	46,5	50,0	41,3	55,3	3,5	3,12	6,47	0,938	*	60
Escarific.	49,4	49,0	46,0	56,0	48,0	50,0	45,0	53,0	2,0	2,13	4,30	0,876	*	60
A. Disco	47,6	47,0	41,0	55,0	45,0	50,0	37,5	57,5	5,0	3,68	7,72	0,940	*	60
Rotavaç.	44,4	44,0	39,0	51,0	42,0	47,0	34,5	54,5	5,0	3,20	7,21	0,945	*	60
65 dias após a emergência														
Alternad.	44,0	44,0	39,0	54,0	40,0	46,5	30,3	56,3	6,5	4,13	9,39	0,902	*	40
Escarific.	46,3	45,0	40,0	55,0	42,5	50,0	31,3	61,3	7,5	4,30	9,30	0,888	*	40
A. Disco	44,8	44,0	39,0	55,0	41,5	49,0	30,3	60,3	7,5	4,63	10,34	0,915	*	40
Rotavaç.	40,5	40,0	36,0	47,0	38,5	42,0	33,3	47,3	3,5	2,45	6,04	0,962	ns	40
72 dias após a emergência														
Alternad.	40,4	40,0	30,0	50,0	36,0	44,5	23,3	57,3	8,5	5,44	13,48	0,947	*	60
Escarific.	39,2	40,0	30,0	55,0	35,5	42,0	25,8	51,8	6,5	5,51	14,06	0,947	*	60
A. Disco	35,0	35,0	26,0	45,0	30,0	39,5	15,8	53,8	9,5	5,06	14,48	0,934	*	60
Rotavaç.	35,5	35,0	27,0	46,0	33,0	38,0	25,5	45,5	5,0	4,64	13,09	0,958	ns	60
76 dias após a emergência														
Alternad.	39,8	40,0	30,0	49,0	38,0	42,0	32,0	48,0	4,0	3,56	8,93	0,973	ns	50
Escarific.	38,5	38,0	30,0	50,0	35,0	41,0	26,0	50,0	6,0	4,24	11,03	0,957	ns	50
A. Disco	37,1	36,5	30,0	45,0	34,0	39,0	26,5	46,5	5,0	3,83	10,32	0,924	*	50
Rotavaç.	38,3	39,0	33,0	44,0	36,0	40,0	30,0	46,0	4,0	2,84	7,43	0,948	*	50

Média: média aritmética; Med.: mediana; Min.: valor mínimo observado; Max.: valor máximo observado; 1º Q: primeiro quartil; 3º Q: terceiro quartil; d: amplitude interquartilica ($Q_3 - Q_1$); LEI: limite extremo inferior ($Q_1 - 1,5d$); LES: limite extremo superior ($Q_3 + 1,5d$); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: estatística do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; ns: a hipótese de normalidade não é rejeitada, *: rejeita-se a hipótese de normalidade, n: número de dados amostrados e analisados.

Tabela 32A. Análise de variância (ANOVA) para a altura de planta em diferentes dias após a emergência dentro do sistema de preparo do solo.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	Prob(F>F _c)
Sistema de preparo do solo (SPS)	3	1274,28	424,76	153,43	0,00000
Erro	27	74,75	2,77	377,39	0,00000
Dias após emergência (DAE)	9	16686,94	1854,10	252750	0,00000
Erro (DAE)	1490	10,93	0,01		

Tabela 33A. Estatísticas do critério do teste da Manova e teste exato de F para verificar o efeito do SPS para as componentes da produção.

Fontes de Variação	Λ de Wilk	Valor de F	Grau de liberdade		prob(F>F _c)
			Numerador	Denominador	
Sistema preparo do solo(SPS)	0,011	1,868	27	36	0,001196

Tabela 34A. Resultados de umidade média do solo observados ao longo do ciclo do feijoeiro, no período de 6 a 81 DAE, nas parcelas sob diferentes sistemas de preparo do solo, em Campinas – SP, no ano de 1999.

Profundidade	Tratamento								
	Escarificador			Arado de Disco			Enxada Rotativa		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
(m)	--- kg kg ⁻¹ ---		%	--- kg kg ⁻¹ ---		%	--- kg kg ⁻¹ ---		%
0–0,10	0,265	0,0417	15,7	0,257	0,0368	14,3	0,248	0,0388	15,6
0,10-0,20	0,255	0,0308	12,1	0,257	0,0308	12,0	0,256	0,0293	11,5
0,20-0,30	0,255	0,0264	10,4	0,255	0,0250	9,8	0,262	0,0272	10,4
0,30-0,40	0,260	0,0285	11,0	0,264	0,0244	9,2	0,270	0,0254	9,4
0,40-0,50	0,269	0,0230	8,6	0,267	0,0213	8,0	0,276	0,0237	8,6

Média: média aritmética; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação